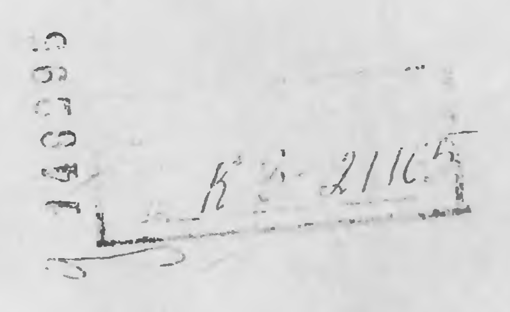
Ю. П. Горлов

ТЕХНОЛОГИЯ
ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Допущено
Государственным комитетом СССР
по народному образованию
в качестве учебника для студентов
высших учебных заведений,
обучающихся по специальности
«Производство строительных изделий
и конструкций»





МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1989

ББК 38.3
Г69
УДК 691

Рецензенты:
кафедра «Технология строительства зданий и сооружений на железнодорожном транспорте» Московского института инженеров железнодорожного транспорта (зав. кафедрой проф. В. И. Соломатов); д-р техн. наук А. Ю. Каминскас (ВНИИТеплоизоляция)

Горлов Ю. П.
Г69 Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий: Учеб. для вузов по спец. «Пр-во строит. изделий и конструкций». — М.: Высш. шк., 1989. — 384 с.: ил.

ISBN 5-06-000155-5

В учебнике рассматриваются свойства и теоретические основы получения оптимальных пористых теплоизоляционных и акустических материалов из волокнистых, зернистых и порошкообразных каркасообразующих компонентов. Особое внимание уделяется вопросам снижения топливно-энергетических, материальных и трудовых ресурсов на основе последних достижений науки и техники.

Г $\frac{3306000000(4309000000)-487}{001(01)-89}$ 218—89

ББК 38.3
6С3

ISBN 5-06-000155-5

ПРЕДИСЛОВИЕ

В учебнике в соответствии с программой одноименного курса для специальности 2906 «Производство строительных изделий и конструкций», описаны технология и свойства современных высокопористых материалов, широко применяющихся для тепловой изоляции ограждающих конструкций зданий, горячих поверхностей технологического оборудования и трубопроводов, холодильных установок, а также для борьбы с шумом в помещениях различного назначения.

Объединение в один курс технологии теплоизоляционных и акустических (звукопоглощающих и звукоизоляционных) материалов продиктовано общностью технологических задач — созданием высокопористых структур этих материалов, что и явилось методологической основой курса. Это позволило рассмотреть все многообразие материалов и изделий с единых теоретических и технологических позиций, систематизировать весьма сложные и разнообразные задачи, стоящие перед студентами при изучении данного курса.

В учебнике примерно 25% объема посвящено теоретическим основам получения высокопористых материалов из различного сырья, оптимизации пористых структур с позиций функциональных и общестроительных свойств рассматриваемых материалов при их применении в различных условиях эксплуатации.

При описании технологии отдельных видов материалов и изделий основное внимание уделено физико-химической сущности создания данного материала, а также рассмотрению путей повышения эффективности производства с позиций ресурсосбережения и повышения качества продукции.

Значительная часть учебника посвящена проблеме вовлечения в производство строительных материалов вторичных ресурсов, возможным путям рационального использования промышленных отходов для получения высокопористых материалов, экономическому и экологическому значению данной

проблемы с учетом последних достижений строительной науки и передовых производственных предприятий.

В последнем разделе учебника обобщены сведения о современном состоянии производства и применении высокопористых материалов в строительстве и промышленности с позиций их технико-экономической эффективности, а также обсуждены возможные пути повышения качества теплоизоляционных и акустических материалов и изделий на основе совершенствования и создания новых технологий.

Автор выражает глубокую благодарность коллективу кафедры «Технология строительства зданий и сооружений на железнодорожном транспорте» Московского института инженеров железнодорожного транспорта, руководимому проф. д-ром техн. наук В. И. Соломатовым, а также д-ру техн. наук А. Ю. Каминскасу за ценные замечания, сделанные ими при рецензировании рукописи.

Автор с признательностью примет все критические замечания и рекомендации, направленные на улучшение книги.

Автор

ВВЕДЕНИЕ

В своей работе «Развитие капитализма в России» В. И. Ленин писал: «Одним из необходимых условий роста крупной машинной индустрии (и чрезвычайно характерным спутником ее роста) является развитие промышленности, дающей топливо и материалы для построек, и строительной промышленности» *. Эта мысль В. И. Ленина проходит через всю историю развития нашего государства, неуклонного возрастания его материально-технической базы, подъема материального и культурного уровня советского народа.

Коммунистическая партия и Советское правительство уделяют большое внимание капитальному строительству как одному из определяющих факторов создания материально-технической базы. Из пятилетки в пятилетку возрастает объем капитальных вложений в промышленное и жилищное строительство, строительство культурно-бытовых объектов, домов отдыха, школ, больниц, дошкольных учреждений, различного рода спортивных сооружений.

Технический прогресс в строительстве существенным образом зависит от уровня развития предприятий промышленности строительных материалов, от их оснащенности современной технологией, позволяющей чутко реагировать на возрастающие требования строительного производства, новые экономичные конструкционные решения зданий и сооружений, их эстетический облик, комфортность внутренних помещений.

Необходимо отметить, что промышленность строительных материалов никоим образом не является пассивным участником развития технического прогресса в строительном комплексе. Наоборот, производя новые эффективные материалы, изделия и конструкции, она самым активным образом влияет на развитие технического прогресса в технологии строительного производства, изменяя методы и темпы производства различных видов строительных работ, создавая новые возможности по улучшению планировки зданий, разнообразию их архитектурных форм, повышению комфортабельности помещений.

К числу эффективных строительных материалов, позволяющих существенно снизить материалоемкость и стоимость строительных конструкций и сооружений в целом, а также повысить степень индустриализации строительства, относятся теплоизоляционные материалы.

Теплоизоляционные материалы — разновидность строительных материалов, характеризующихся малой теплопроводностью.

---

* *Ленин В. И.* Полн. собр. соч. Т. 3. С. 525.

Как известно, тепловой поток через какое-либо ограждение, разделяющее среды с разными температурами, направлен от нагретой к холодной среде. Любой материал, из которого выполнено ограждение, в той или иной степени препятствует передаче тепла. Степень сопротивления ограждения теплопередаче можно существенно повысить путем увеличения толщины ограждения либо путем применения теплоизоляционных материалов, позволяющих значительно уменьшить толщину и, следовательно, материалоемкость ограждения.

Малая теплопроводность теплоизоляционных материалов обусловлена их высокопористым строением. Воздух, заполняющий поры и находящийся в спокойном состоянии, является плохим проводником теплоты и создает вследствие этого большое сопротивление теплопередаче.

Таким образом, отличительная особенность теплоизоляционных материалов — высокопористая структура. По этому признаку все теплоизоляционные материалы независимо от применяющегося для их изготовления сырья и способов получения объединены в единый раздел учебной дисциплины «Технология теплоизоляционных и акустических материалов и изделий».

Функциональное назначение теплоизоляционных материалов — устройство тепловой изоляции ограждающих конструкций зданий и сооружений, технологической аппаратуры, тепловых и холодильных установок и различных трубопроводов.

В понятие «тепловая изоляция» вкладывают весьма широкое и не всегда одинаковое содержание. В наиболее общем и распространенном смысле под теплоизоляцией понимают технико-экономические мероприятия по уменьшению потерь теплоты во внешнюю среду через ограждающие поверхности зданий и сооружений (строительная теплоизоляция), промышленных тепловых установок и теплопроводов (высокотемпературная теплоизоляция), различного рода холодильных установок помещений и емкостей, внутри которых поддерживается отрицательная температура (хладоизоляция).

Выражение «тепловая изоляция» часто употребляют для названия теплоизоляционных конструкций (например, теплоизоляция стен, кровель, трубопроводов и т. п.).

Теплоизоляционные материалы широко применяют в строительстве, промышленности, на транспорте. При этом достигается весьма большой технико-экономический эффект. В строительстве применение этих материалов позволяет существенно снизить массу зданий и сооружений, т. е. достичь экономию материальных ресурсов и, следовательно, снизить транспортные расходы, расходы на производство монтажных работ.

Снижение массы строительных конструкций позволяет увеличить их габариты, т. е. повысить степень индустриализации строительного производства, а также существенно экономить основные строительные материалы: цемент, металл, древесину, кирпич и др.

Создание и применение новых более эффективных видов теплоизоляционных материалов, совершенствование тепловой изоляции ограждающих конструкций зданий неизбежно приводят к сокращению расхода топлива на отопление зданий и повышению комфорта в помещениях.

Так, подсчитано, что в среднем общая масса конструкций здания в расчете на 1 м² жилой площади составляет для кирпичного и крупноблочного домов около 3 т, крупнопанельного — около 2 т. В случае же применения легких стеновых панелей, утепленных эффективным теплоизоляционным материалом, масса конструкций на 1 м² здания снижается до 0,5...0,8 т, т. е. в 4...6 раз.

При применении теплоизоляционных материалов в ограждающих конструкциях панельных и каркасно-панельных зданий сокращается расход стали в 1,5...3 раза и цемента в 3...4 раза по сравнению со стенами без тепловой изоляции; 1 т минераловатного утеплителя заменяет не менее 7,5 тыс. шт. кирпича.

Соответственно со снижением массы зданий сокращаются перевозки не только готовых строительных материалов и сборных конструкций на стройплощадку, но и сырьевых материалов от места их добычи на заводы-изготовители. Все это дает весьма существенный экономический эффект, исчисляемый в масштабе страны десятками миллиардов рублей.

В промышленности теплоизоляционные материалы применяют с целью сокращения теплопотерь через ограждающие конструкции тепловых агрегатов и теплопроводов, экономии ценного огнеупорного сырья, тепловой защиты строительных конструкций и оборудования от вредного воздействия высоких температур, интенсификации технологических процессов, создания нормальных условий для работы людей в горячих цехах.

Например, изоляция поверхности оборудования и трубопроводов на тепловых электростанциях снижает потери теплоты в 25 раз. Так, без изоляции теплопотери на 1000 кВт установочной мощности составляют 1450...2950 кДж/ч, что эквивалентно примерно 12...25% расхода топлива. Потери же теплоты через слой изоляции составляют лишь 65...130 кДж/ч, что равно 0,5...1% расхода топлива. Замена кирпичной кладки легким жаростойким материалом «керамволом» при строительстве кольцевых печей для обжига глиняного кирпича позволяет в 15 раз уменьшить массу печи, существенно повысить ее производительность и снизить удельный расход топлива.

Еще бóльшую экономию энергии дает применение теплоизоляционных материалов при транспортировке и хранении сжиженных газов, при тепловой изоляции стационарных, передвижных (железнодорожные вагоны, суда-рефрижераторы и т. п.) холодильников и другого холодильного оборудования.

Производство теплоизоляционных материалов — одна из молодых подотраслей промышленности строительных материалов. Однако в связи с высокой эффективностью применения этих материа-

лов в народном хозяйстве их производство за последние 30 лет бурно развивалось.

Начало заводского производства теплоизоляционных материалов относится к концу второй пятилетки (1933—1937). В годы Великой Отечественной войны выпуск этих материалов сократился, а в послевоенное время стал быстро возрастать. Это положение хорошо иллюстрируется на примере темпов развития производства минеральной ваты, являющейся основным продуктом теплоизоляционной промышленности. Так, в 1940 г. в стране было всего три предприятия, вырабатывающих минеральную вату. Годовой объем продукции этих предприятий составлял всего 30 тыс. м³. В послевоенный период было организовано и развито производство и других видов теплоизоляционных материалов: цементного фибролита, автоклавного ячеистого бетона, пеностекла, вспученного перлита, газонаполненных пластмасс и др. Общий объем выпуска теплоизоляционных материалов к 1985 г. увеличился более чем в 25 раз.

В постановлениях ЦК КПСС и Совета Министров СССР постоянно делался упор на повышение эффективности во всех отраслях народного хозяйства и повышение качества работы.

XXVII съезд КПСС с особой силой подчеркнул необходимость кардинального повышения эффективности строительного производства на основе достижений современной науки и техники, совершенствования механизма управления отраслью.

В связи с этим характерной чертой развития производства теплоизоляционных материалов, без которых невозможно дальнейшее развитие капитального строительства, в настоящее время является преимущественное увеличение выпуска эффективных теплоизоляционных материалов.

К таким материалам относятся: минераловатные изделия на синтетических связующих (жесткие плиты и плиты повышенной жесткости), а также минераловатные маты с обкладками и без них; стекловолокнистые плиты и маты; изделия из вспученного перлита; калиброванные плиты из ячеистого бетона со средней плотностью не выше 250 кг/м³; изделия из пластмасс высокопористой структуры и пониженной горючести.

Усилиями научных и производственных коллективов расширяется номенклатура эффективных теплоизоляционных материалов, предназначенных для строительной и промышленной теплоизоляции, разрабатываются новые технологические приемы их получения, обеспечивающие ресурсосбережение как в сфере производства, так и в сфере применения, все шире используются в качестве сырья отходы и побочные продукты других производств.

Второй группой материалов, рассматриваемых в рамках данной дисциплины, являются акустические материалы, применение которых в строительстве и промышленности призвано создавать комфортные условия в жилых, общественных и производственных помещениях, снижать вредное воздействие шума на организм человека.

Эти материалы по своему функциональному назначению подразделяются на следующие виды:

звукопоглощающие материалы, предназначенные для гашения воздушных шумов и регулирования акустических характеристик помещений;

звукоизоляционные материалы, применяемые в качестве прокладок под плавающими полами и в многослойных ограждающих конструкциях для изоляции ограждений от ударного и воздушного звуков;

вибропоглощающие материалы, предназначенные для ослабления изгибных колебаний, распространяющихся по жестким (преимущественно тонким) конструкциям, для снижения излучаемого ими шума.

Звукопоглощающие материалы и отчасти звукоизоляционные близки по своей структуре и методам получения к теплоизоляционным материалам, что и позволило объединить изучение их технологии в одну учебную дисциплину.

Начало широкого заводского производства акустических (особенно звукопоглощающих) материалов в СССР связано с развитием производства теплоизоляционных материалов и относится к 50-м годам. Широкое применение звукопоглощающих и звукоизоляционных материалов в жилых, производственных и общественных зданиях, в зданиях и сооружениях культурно-массового назначения повысило возросшую культуру строительства в нашей стране, призванную обеспечивать повышенную комфортабельность для жизни, труда и отдыха советских людей.

Особенно бурное развитие производств и применение акустических материалов в строительной практике получили в последние 20 лет. При этом особое внимание уделялось и уделяется созданию наиболее эффективных материалов, сочетающих в себе акустические и декоративные свойства и получивших поэтому название декоративно-акустических материалов. К таким материалам относят жесткие минераловатные изделия в виде плит для навесных потолков с декорированной поверхностью, газобетонные, пеногипсовые, комбинированные плитные изделия с фасонной или плоской поверхностью, перфорированные цветные листы и др.

Создание новых видов акустических материалов, отличающихся более высокими функциональными и эксплуатационными свойствами, является и по сей день весьма важной задачей научно-исследовательских, проектных и производственных коллективов строительной отрасли народного хозяйства.

Советские ученые внесли большой вклад в теорию и практику развития производства теплоизоляционных и акустических материалов и изделий. Используя основополагающие материалы, изложенные в трудах Б. Г. Скрамтаева, П. П. Будникова, Ю. И. Бутта, А. В. Волженского, П. И. Боженова, Н. А. Попова, А. И. Августиника, В. В. Тимашева, И. И. Китайгородского, наиболее существенный вклад в развитие производства теплоизоляционных и акусти-

ческих материалов в СССР внесли К. Э. Горяйнов, А. П. Меркин, В. А. Китайцев, А. И. Жилин, А. Ю. Каминскас, В. И. Соломатов, М. И. Хигерович, А. В. Жуков, А. Т. Баранов, Ю. Л. Бобров, В. Н. Соков, Б. М. Румянцев, Г. Я. Кунос, Р. А. Андрианов и многие другие. Ими сформулированы научные концепции, вскрыты закономерности получения высокопористых материалов с высоко организованной пористой структурой, обеспечивающей высокие функциональные свойства материалов, получаемых из различного вида сырья: разработаны эффективные способы порообразования, которые реализованы в производстве и продолжают совершенствоваться.

Процесс поиска новых принципов производства высокопористых материалов продолжается и в настоящее время. В нем участвуют научные коллективы ряда научно-исследовательских институтов.

Основной задачей текущего момента и на перспективу является вовлечение в сферу производства максимально возможных объемов побочных продуктов других отраслей и промышленных отходов, образующихся в весьма большом количестве, исчисляемом миллиардами тонн, при добыче и сжигании углей, выплавке черных и цветных металлов, производстве и применении стекол, переработке нефти, производстве удобрений, добыче и переработке руды и нерудных полезных ископаемых и т. п.

Решение этой проблемы кроме значительного технико-экономического эффекта имеет важное экологическое значение.

ЧАСТЬ I

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ И ЗВУКЕ. ТРЕБОВАНИЯ К ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫМ И АКУСТИЧЕСКИМ МАТЕРИАЛАМ

Процесс передачи теплоты (теплопередачи) весьма сложен и зависит от множества факторов, знание которых и управление которыми позволяют технологам и конструкторам создавать наиболее эффективные теплоизоляционные материалы и конструкции для разных условий службы.

Борьба с шумом в производственных помещениях и создание комфортных условий в жилых, общественных, учебных, лечебных и других зданиях являются одним из важнейших мероприятий по сохранению и укреплению здоровья советских людей. Знание закономерностей распространения звука в различных средах при различных его параметрах позволяет целенаправленно проводить мероприятия по борьбе с шумом: создавать эффективные акустические материалы и конструкции, использовать различного рода экраны, позволяющие существенно снижать интенсивность шума в помещениях.

ГЛАВА 1

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА. ТРЕБОВАНИЯ К ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫМ МАТЕРИАЛАМ

Передача теплоты, происходящая в твердых телах, жидкостях и газах, неоднозначна и определяется существующими для каждой из них закономерностями.

1.1. Основные представления о теплопередаче

Теплопередачей называют теплообмен между двумя теплоносителями через разделяющую их твердую стенку или через поверхность раздела между ними.

Количество теплоты, переданное через изотермическую поверхность в единицу времени, называют *тепловым потоком* и измеряют в Вт (Дж/с). Интенсивность теплового потока прямо пропорциональна разности температур на нагретой и холодной поверхностях,

т. е. температурному градиенту, который является вектором и имеет положительный знак при возрастании температуры.

Температурный градиент есть не что иное, как предел отношения изменения температуры Δt к расстоянию между изотермами по нормали Δn при условии, что $\Delta n \to 0$, т. е.

$$\lim\left[\frac{\Delta t}{\Delta n}\right]_{\Delta n\to 0}=\frac{\partial t}{\partial n}=\operatorname{grad} t. \qquad (1.1)$$

Это выражение справедливо для стационарного теплового режима.

Тепловой поток, отнесенный к единице поверхности тела, через которое осуществляется процесс теплопередачи, называют *поверхностной плотностью теплового потока* $g=Q/F$, Вт/м². Величина g — вектор, направление которого противоположно направлению температурного градиента, так как тепловая энергия самостоятельно распространяется только в сторону убывания температуры.

Любой материал, из которого выполнена стенка, разделяющая теплую и холодную среды, оказывает большее или меньшее сопротивление тепловому потоку. Величина этого сопротивления зависит от способности вещества (материала) проводить теплоту, т. е. от его теплопроводности, которая для каждого вещества имеет свое определенное значение и зависит от многих причин: агрегатного состояния вещества, его структуры, плотности, влажности, давления и температуры.

Основной закон теплопроводности сформулирован Фурье: плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры:

$$Q=\lambda F\operatorname{grad} t, \qquad (1.2)$$

где λ — множитель пропорциональности, характеризующий способность вещества (материала) проводить теплоту, т. е. его теплопроводность.

Из уравнения (1.2), которое является математическим выражением основного закона распространения теплоты путем теплопроводности (закон Фурье), следует, что теплопроводность λ, Вт/(м·К) или Вт/(м·°С), определяет интенсивность теплового потока, проходящего через 1 м² поверхности при температурном градиенте 1 К/м (1 °С/м), т. е. при разности температур на горячей и холодной сторонах материала толщиной 1 м в 1 К или 1 °С.

Перенос теплоты теплопроводностью характерен для веществ (материалов), находящихся в любом агрегатном состоянии. Он имеет место в сплошной среде, т. е. при непосредственном соприкосновении тел или частиц одного тела, имеющих различную температуру. В общем же виде теплоперенос представляет собой сложный теплофизический процесс, в котором можно выделить кроме теплопроводности еще два элементарных вида переноса теплоты: конвекцию и тепловое излучение.

Конвекцией называют перенос теплоты в жидкостях, газах или сыпучих средах потоками вещества. Этот вид теплообмена свойствен движущимся жидкостям и газам. При этом различают два

вида конвекции: *естественную*, при которой происходит самопроизвольное перемешивание частей жидкости или газа с различной температурой, и *вынужденную*, когда движение частиц вызывается внешними воздействиями (принудительным перемешиванием, продувкой и т. п.).

Интенсивность конвективного теплообмена (теплопереноса) характеризуется коэффициентом теплопередачи α, определяемым по формуле Ньютона:

$$Q=\alpha F\Delta t, \qquad (1.3)$$

где F — поверхность теплообмена.

Значения α и, следовательно, интенсивность теплообмена зависят от множества параметров этого процесса: формы, размеров и температуры конструкций, скорости движения, температуры и физических свойств (вязкости, теплоемкости, плотности и т. д.) газов или жидкостей и ряда других факторов.

Однако при прочих равных условиях α зависит главным образом от условий движения среды. Поэтому значение конвективного теплообмена в ограждающих строительных конструкциях и теплоизоляционных материалах определяется размером воздушных полостей и пор, а также степенью связанности этих полостей и пор между собой.

Чем больше размер воздушных полостей в конструкции или пор в теплоизоляционном материале, чем больше сечение воздушных ходов, соединяющих эти полости или поры, тем выше α и, следовательно, доля конвективного переноса теплоты в общем объеме теплопередачи в данной ограждающей конструкции или данном теплоизоляционном материале, тем выше общий баланс переноса теплоты.

Тепловым излучением называют перенос теплоты в виде электромагнитных волн с двойным взаимным превращением: тепловой энергии в лучистую на поверхности тела, излучающего теплоту, и лучистой энергии в тепловую на поверхности тела, поглощающего лучистую теплоту. Этот вид теплопередачи возможен лишь в газообразной среде или в вакууме.

Долю теплообмена лучеиспусканием определяют по формуле

$$Q=\varepsilon_{п} C_0 F\left[(T_1/100)^4-(T_2/100)^4\right], \qquad (1.4)$$

где $\varepsilon_{п}$ — приведенная степень черноты тел, между которыми происходит лучистый теплообмен; C_0 — коэффициент излучения черного тела, равный 5,7 Вт/(м²·С⁴); T_1 и T_2 — температуры поверхностей, между которыми происходит теплообмен.

В данной формуле наиболее значимой величиной являются температуры, которые находятся в четвертой степени. Следовательно, лучистый теплообмен решающим образом зависит от температуры материала или, вернее, от разности температур между излучающей теплоту поверхности и поверхности, поглощающей теплоту.

Если рассмотреть элементарную пору в каком-то теплоизоляционном материале, заполненную воздухом или газом, то, опираясь на закономерность, выраженную формулой (1.4), можно сделать следующее заключение. Чем больше диаметр поры, тем больше разница температуры между более и менее нагретыми ее поверхностями, тем, следовательно, более интенсивен теплообмен излучением.

С другой стороны, анализ формулы позволяет сделать заключение о том, что при повышении степени нагретости тела (при повышении температуры эксплуатации материала) передача теплоты излучением возрастает. Практика показывает, что этот вид теплопередачи имеет существенное, а иногда и превалирующее значение только при изоляции промышленного оборудования, т. е. при высоких температурах.

Следует заметить, что элементарные виды теплообмена не обособлены и в чистом виде в задачах строительной теплофизики не встречаются. Как правило, в строительных конструкциях одновременно имеют место все виды теплообмена, поэтому количественная оценка вклада каждого из них в общую теплопередачу затруднена.

Например, в строительных ограждающих конструкциях теплопередача происходит путем теплопроводности и конвективного переноса теплоты. В многослойных конструкциях высокотемпературного технологического оборудования и агрегатов теплоэнергетики теплопередача имеет еще более сложный характер, в ней участвуют все три вида теплообмена.

Таким образом, превалирующее влияние того или иного вида теплопередачи зависит от материалов, из которых изготовлена ограждающая конструкция, величины и характера их пористости, конструктивного решения ограждения, среды, в которой эксплуатируется ограждение, и температуры эксплуатации.

Поскольку известны условия, благоприятствующие тому или иному виду теплопередачи, технолог и конструктор могут решать задачи в каждом конкретном случае по снижению интенсивности теплообмена путем выработки целенаправленных требований к теплоизоляционным материалам и конструкциям в целом.

1.2. Требования к теплоизоляционным материалам

Для снижения интенсивности теплопередачи через строительные ограждающие конструкции необходимо применение теплоизоляционных материалов, оказывающих большое сопротивление конвективному переносу теплоты и характеризующихся малой теплопроводностью.

Следовательно, эти материалы должны характеризоваться высокой общей пористостью, так как воздух, заполняющий поры, — плохой проводник теплоты, и не иметь сплошного каркаса из основного материала. С другой стороны, для снижения конвективного переноса теплоты необходимо стремиться к максимально возможному уменьшению размеров пор и ходов, соединяющих эти поры. При этом теплоизоляционные материалы должны быть защищены от увлажнения, хорошо противостоять процессам гниения, замораживания и оттаивания, т. е. характеризоваться высокими эксплуатационными показателями.

При устройстве тепловой изоляции высокотемпературного технологического оборудования стремятся применять теплоизоляционные материалы из веществ, характеризующихся сравнительно низкой теплопроводностью при высоких температурах, меньшей приведенной степенью черноты, мелкопористой структурой при высокой общей пористости.

В данном случае решающими показателями эксплуатационных свойств теплоизоляционных материалов являются: термическая стойкость — способность материала выдерживать многократное попеременное нагревание и охлаждение; температуростойкость — способность материала длительное время выдерживать воздействие высокой температуры; огнеупорность — способность материала выдерживать, не расплавляясь (не размягчаясь), воздействие высоких температур; коррозионная стойкость — способность материала противостоять агрессивным средам и т. п.

Таким образом, применение теплоизоляционных материалов в ограждающих конструкциях во всех случаях главной целью имеет максимально возможное снижение теплопередачи в той или иной конструкции без увеличения, а чаще при уменьшении общей толщины ограждения.

С целью оптимизации ограждающей конструкции по термическому сопротивлению, материалоемкости и экономическому фактору необходимо в каждом конкретном случае производить теплотехнический расчет ограждения.

При выборе схемы расчета теплопроводности ограждающих конструкций любого назначения учитывают число слоев, составляющих конструкцию, форму конструкции, характеристики материалов, из которых она выполнена, и температурный градиент.

По числу слоев конструкции подразделяют на однослойные и многослойные. Однако с позиций теплофизики практически все строительные ограждающие конструкции и тем более ограждения высокотемпературного технологического оборудования и трубопроводов следует считать многослойными. Например, однослойные (по строительной номенклатуре) стеновые панели из керамзито- или газобетона фактически состоят из трех слоев: наружного фактурного слоя (керамическая или стеклянная плитка, декоративная штукатурка), слоя основного материала и внутреннего отделочного слоя. Теплопроводность каждого из этих слоев различна.

По форме ограждающие конструкции подразделяют на плоские, цилиндрические (трубопроводы) и шаровые стенки (емкости для хранения сжиженного газа, воды и др.).

Для расчета теплопередачи ограждающих конструкций существует ряд формул, с которыми студенты знакомятся при изучении

курса «Термодинамика и теплопередача». Анализируя формулы расчета теплопроводности различных строительных и теплоизоляционных конструкций, можно отметить следующее.

1. Теплопроводность конструкций различной формы с удовлетворительной точностью можно описать единой формулой:

$$Q = \lambda F_x \Delta t / \delta, \tag{1.5}$$

где F_x — расчетная поверхность тела; λ/δ — термическое сопротивление или сопротивление теплопередаче.

2. В расчетах принимается, что температура поверхностей тела во всех точках одинакова или незначительно отличается. Если же температура на поверхности изменяется резко, то необходимы сложные расчеты или экспериментальное определение теплопроводности.

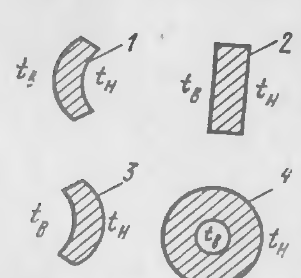


Рис. 1.1. Влияние формы теплоизолирующей конструкции на теплопотери:

1 — вогнутая стенка; *2* — плоская стенка; *3* — выпуклая стенка; *4* — цилиндрическая стенка

3. Тепловые потери конструкций из одинаковых материалов зависят при прочих равных условиях от формы конструкции, так как она предопределяет площадь поверхности теплопередачи. Поэтому наименьшие потери характерны для вогнутых поверхностей, наибольшие — для выпуклых; для плоской стенки показательны промежуточные значения (рис. 1.1). Исходя из этого, особенно нерационально использовать малоэффективные теплоизоляционные материалы для изоляции трубопроводов и тем более шаровых емкостей, так как увеличение толщины теплоизоляционного слоя может привести к повышению теплопотерь вследствие опережающего прироста площади поверхности по отношению к приросту термического сопротивления.

4. Для расчетов теплопередачи через теплоизоляцию горячего оборудования необходимо знать коэффициенты теплопередачи на горячей и холодной сторонах стенки ($\alpha_г$ и $\alpha_х$).

С учетом этих коэффициентов поток теплоты, передаваемый через стенку, описывается уравнением

$$g = \frac{1}{1/\alpha_х + \delta/\lambda + 1/\alpha_г} \Delta t = K \Delta t, \tag{1.6}$$

где K — коэффициент теплопередачи, зависящий от толщины стенки, ее теплопроводности и коэффициентов теплоотдачи.

Величину, обратную K, называют полным термическим сопротивлением теплопередачи R

$$R = 1/K = 1/\alpha_х + \delta/\lambda + 1/\alpha_г \tag{1.7}$$

которая задается при проектировании ограждений.

При расчете ограждающих конструкций зданий учитывают погодные условия данной местности, которые приведены в СНиПах для всех климатических районов и подрайонов СССР. На основе этих показателей рассчитывают сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций R_0, которое должно быть не меньше требуемого $R_0^{тр}$, устанавливаемого санитарно-гигиеническими условиями и определяемого экономическим расчетом $R_0^{эк}$. Требуемое сопротивление теплопередаче

$$R_0^{тр} = n (t_в - t_н)/(\Delta t^н \alpha_в), \tag{1.8}$$

где n — коэффициент, зависящий от местоположения наружной поверхности конструкции (изменяется от 0,4 для стен, отделяющих отапливаемые помещения от неотапливаемых, до 1,0 для наружных стен); $t_в$ — расчетная нормируемая температура внутри помещения; $t_н$ — расчетная зимняя температура наружного воздуха, зависящая от климатического района и массивности конструкции; $\Delta t_н$ — нормируемый температурный перепад между температурами внутреннего воздуха и стеной (гигиенический параметр, определяющий неблагоприятные условия пребывания людей в помещении); $\alpha_в$ — коэффициент теплопередачи внутренней поверхности ограждения.

Если ограждающая конструкция имеет неодинаковое поперечное сечение, что часто имеет место, то при теплофизических расчетах и проектировании конструкции рассчитывают среднее значение и определяют необходимые теплозащитные свойства наименее утепленных участков конструкции, чтобы обеспечить температуру выше точки росы на их поверхности и исключить образование конденсата.

Толщину ограждений определяют, исходя из расчетного сопротивления конструкции R и теплопроводности материала:

$$\delta = R\lambda. \tag{1.9}$$

Если известны значения R и λ, легко ориентировочно рассчитать толщину теплоизоляционного слоя и материалоемкость ограждений с различными видами теплоизоляции (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Толщина и материалоемкость стены жилого дома из различных строительных материалов (средняя полоса СССР, $R = 1.0$)

Материал стены	λ, Вт/(м·°С)	Толщина стены, м	Масса 1 м² стены, кг
Кирпичная кладка	0,77	0,66	1280
Керамзитобетон	0,41	0,35	380
Газобетон ($\rho_{ср} = 600$ кг/м³)	0,21	0,2	120
Алюминиевая конструкция с пенополиуретаном	0,041	0,05	40

Сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций с учетом экономических условий определяют по формуле

$$R_0^{тр} = (Б_к + Б_э + T_э)/K_{огр}, \quad (1.10)$$

где $Б_к$ — удельные капитальные вложения в устройство теплоснабжения; $Б_э$ — годовые удельные эксплуатационные затраты на отопление; $T_э$ — нормативный срок окупаемости дополнительных капиталовложений; $K_{огр}$ — стоимость 1 м³ однослойной ограждающей конструкции или теплоизоляционного слоя многослойной конструкции.

Из формулы (1.10) следует, что для сохранения постоянным $R_0^{эк}$ удорожание теплоизоляционного материала должно быть пропорционально снижению теплопроводности. Например, если сравнить удельную стоимость фибролита $S_{уд} = \lambda K_{огр} = 0{,}098 \cdot 18{,}5 = 1{,}6$ с удельной стоимостью пенополистирола, равной $0{,}041 \cdot 35 = 1{,}2$, то можно убедиться, что в данном случае достигается явное снижение удельной стоимости, несмотря на более высокую стоимость 1 м³ последнего. Из этого следует, что необходимо стремиться к производству и применению материалов с пониженной теплопроводностью.

При расчете высокотемпературной теплоизоляции придерживаются следующего порядка. По нормативам устанавливают допустимые тепловые потери для данного высокотемпературного оборудования с изоляцией. Затем выбирают вид теплоизоляционного материала с учетом температурных условий службы, средней продолжительности его службы в данных условиях эксплуатации, экономических соображений, в том числе степени индустриализации тепломонтажных работ. Для выбранного теплоизоляционного материала (конструкции) по таблице находят значение теплопроводности при средней температуре эксплуатации. При расчете температуру горячей поверхности теплоизоляционного слоя для упрощения принимают равной температуре стенки оборудования или первого слоя футеровки. Зная температуру на горячей и холодной поверхностях теплоизоляционного слоя, а также его теплопроводность, определяют требуемую толщину тепловой изоляции.

Затем производят проверочный расчет, определяя среднюю температуру теплоизоляционного слоя и температуру холодной поверхности. В случае существенных расхождений в значениях этих показателей расчет повторяют, задаваясь новым значением температуры на поверхности теплоизоляции, и так повторяют до примерного совпадения заданных и полученных значений или применяют более эффективный теплоизоляционный материал, особенно в том случае, когда толщина тепловой изоляции ограничена из-за конструктивных соображений.

ГЛАВА 2

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ЗВУКЕ. ТРЕБОВАНИЯ К АКУСТИЧЕСКИМ МАТЕРИАЛАМ

Звук — упругие волны, возникающие в газах, жидкостях и твердых телах от механических колебаний и распространяющиеся в этих средах. Звук характеризуется частотой ν, интенсивностью I и звуковым давлением p. Скорость распространения звуковых волн зависит от упругих свойств, температуры и плотности среды, в которой они распространяются. Например, скорость распространения звуковых волн в спокойном воздухе при температуре 20°C равна 343 м/с, в стали — 5000, в бетоне — 4000 м/с.

2.1. Основные понятия о звуке

Часть пространства, в котором распространяются звуковые волны, называют *звуковым полем.*

При звуковых колебаниях среды, например воздуха, элементарные частицы этой среды начинают колебаться относительно начального своего положения. Скорость этого колебания v намного меньше скорости распространения звуковых волн в воздухе c. Во время распространения звуковых колебаний в воздухе появляются области повышенного давления и разряжения, которые определяют звуковое давление как разность давлений в возмущенной и невозмущенной воздушной среде.

Таким образом, *звуковое давление* — переменное избыточное давление, возникающее в среде при прохождении звуковой волны. Обычно звуковое давление мало по сравнению с постоянным давлением в среде.

При распространении звуковых волн происходит перенос кинетической энергии, величина которой определяется интенсивностью звука.

В условиях свободного звукового поля, когда отсутствуют отраженные звуковые волны, интенсивность звука измеряется средним количеством звуковой энергии, проходящей в единицу времени через единицу поверхности перпендикулярно направлению распространения звука, Н/(м·с):

$$I = vp \quad \text{или} \quad I = p^2/\rho c, \quad (2.1)$$

где v — мгновенное значение скорости колебаний, м/с; p — мгновенное значение звукового давления, Па; ρ — плотность среды, кг/м³; c — скорость звука в данной среде, м/с.

Произведение ρc представляет собой удельное акустическое сопротивление среды (волновое сопротивление), Н·с/м³.

Величины минимального звукового давления p_0 и интенсивности I_0, едва различимые органом слуха человека, называют *пороговы-*

ми. При частоте звука 1000 Гц эти значения составляют соответственно $2 \cdot 10^{-5}$ Па и 10^{-12} Н/(с·м). Сила же звука на грани болевого ощущения в 10^{14} раз превышает силу звука на пороге слышимости.

Таким образом, человек способен воспринимать звуки в большом диапазоне интенсивностей. Поэтому для оценки акустической характеристики помещений пользоваться абсолютными значениями этих величин из-за широкого диапазона частот крайне неудобно.

В акустике принято измерять не абсолютные значения интенсивности звука или давления, а их относительные логарифмические уровни L, взятые по отношению к пороговому значению I_0 или p_0. Если интенсивность звука I больше исходной в 10 раз, т. е. если $I/I_0 = 10$, то принято считать, что интенсивность звука превышает исходную на 1 Б (Бел), при $I/I_0 = 100$ на 2 Б и т. д.

Орган слуха человека способен различать прирост звука на 0,1 Б, т. е. на 1 дБ (децибел), который и принят в практике акустических измерений за основную единицу. Таким образом, уровень интенсивности звука, дБ, равен

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0}. \quad (2.2)$$

Интенсивность звука пропорциональна квадрату звукового давления (2.1). Следовательно, уровень силы звука можно выразить через звуковое давление:

$$L = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{p}{p_0}. \quad (2.3)$$

Эта характеристика, представляющая собой уровень звукового давления, принята для всех акустических измерений и выражения нормативных данных.

На человеческий организм шум воздействует отрицательно: снижает остроту слуха, рассеивает внимание, мешает разговорной речи, а при повышении интенсивности и длительном воздействии шума изменяется кровяное давление, ухудшаются координация движений, зрение, возникают изменения в сердечно-сосудистой и нервной системах.

Поэтому борьба с шумом, снижение его интенсивности до нормативных значений в производственных, общественных, жилых помещениях на территории городов и отдельных предприятий является весьма актуальной задачей. Эта борьба ведется всеми доступными средствами, применение которых основано на законах гашения звуковых волн, создания преград на пути их распространения.

Одним из наиболее действенных мероприятий в этом направлении является применение звукопоглощающих и звукоизоляционных материалов и рационально изготовленных из них конструкций.

2.2. Требования к звукопоглощающим и звукоизолирующим материалам

Звукопоглощающие материалы характеризуются высокопористой структурой.

При этом эффективность звукопоглощения при прочих равных условиях зависит от параметров этой структуры, которые должны направленно регулироваться в зависимости от превалирующей частоты звуковых волн в данном помещении.

Сущность физического явления, происходящего при гашении звука пористым телом, заключается в следующем. Звуковые волны, падая на поверхность такого материала и проникая далее в его поры, возбуждают колебания воздуха, находящегося в узких порах. При этом значительная часть звуковой энергии расходуется. Высокая степень сжатия воздуха и его трение о стенки пор вызывают разогрев. За счет этого кинетическая энергия звуковых колебаний преобразуется в тепловую, которая рассеивается в среде.

Гашению звука способствует деформирование гибкого скелета звукопоглощающего материала, на что также тратится звуковая энергия; особенно этот вклад заметен в пористо-волокнистых материалах с открытой сообщающейся пористостью при ее общем объеме не менее 75%.

Звукоизолирующие качества ограждений основаны на применении специальных конструкций, как правило многослойных, оказывающих повышенное сопротивление прохождению звуковых волн как ударного характера, так и распространяющихся в воздушной среде.

Придание звукоизолирующих свойств ограждению основывается на трех основных физических явлениях: отражении воздушных звуковых волн от поверхности ограждения, поглощении звуковых волн материалом ограждения, гашении ударного или воздушного шума за счет деформации элементов конструкции и материалов, из которых она изготовлена.

Способность отражать звуковые волны важна для наружных ограждений зданий. В этом случае для повышения отражения воздушных звуковых волн стремяться применять массивные конструкции с гладкой наружной поверхностью.

Отражающая способность преграды характеризуется коэффициентом отражения β:

$$\beta = E_{отр}/E_{пад} < 1, \quad (2.4)$$

где $E_{пад}$ и $E_{отр}$ — соответственно падающая и отраженная звуковая энергия.

Для внутренних помещений, как правило, высокая отражающая способность ограждения (перегородок) недостаточна, так как отраженные звуковые волны будут усиливать шум в наиболее шумном помещении. В данном случае применяют многослойные конструкции, в состав которых входят элементы из звукоизоляционных

материалов, эффективность которых оценивается динамическим модулем упругости. В качестве звукоизоляционных прокладок применяют пористо-волокнистые материалы из минеральной и стеклянной ваты, древесных волокон (древесно-волокнистые плиты), засыпки из пористых зерен (керамзита, шлака и т. п.).

Снижению уровня ударных и звуковых шумов способствуют малый динамический модуль упругости звукоизоляционных материалов и наличие воздуха в порах. В данном случае снижение интенсивности звука происходит за счет деформации элементов структуры звукоизоляционных материалов и частично за счет звукопоглощения.

Качество звукоизоляционных ограждений оценивают их звукопроводностью τ:

$$\tau = E_{\text{прош}}/E_{\text{пад}} < 1, \quad (2.5)$$

где $E_{\text{прош}}$ — прошедшая за преграду звуковая энергия.

В соответствии с действующими стандартами материал, применяемый для звукоизоляционных прокладок, должен иметь динамический модуль упругости $E_{\text{д}}$ не более 15 МПа.

ЧАСТЬ II

КЛАССИФИКАЦИЯ, СВОЙСТВА, ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Отечественная промышленность производит несколько десятков разновидностей теплоизоляционных и акустических материалов и изделий из различного природного и искусственного сырья. Это предопределяет многообразие технологических приемов получения и закрепления высокопористой структуры рассматриваемых материалов, придания им различных требуемых свойств, обеспечивающих их технико-экономическую эффективность при службе в различных условиях эксплуатации. Без знания классификационных признаков самих материалов и способов их получения весьма трудно решать разнообразные технологические задачи и осуществлять рациональный выбор материалов для создания тех или иных конструкций. Поэтому в данном разделе учебника изложен материал, позволяющий систематизировать все многообразие сведений о теплоизоляционных и акустических материалах и изделиях.

ГЛАВА 3

КЛАССИФИКАЦИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В соответствии с существующими нормативными документами теплоизоляционные и акустические материалы классифицируют по нескольким основным признакам: виду исходного сырья, форме, внешнему виду, структуре, средней плотности, сжимаемости, теплопроводности, сгораемости, коэффициенту звукопоглощения, продуваемости, модулю упругости.

3.1. Классификация теплоизоляционных материалов

По виду исходного сырья все теплоизоляционные материалы подразделяют на две большие группы: неорганические и органические. К неорганическим материалам относят минеральную и стеклянную вату, пеностекло, ячеистые бетоны, вспученные перлит и вермикулит, теплоизоляционную керамику, асбестосодержащие

теплоизоляционные массы и изделия. Органическими материалами считают материалы на основе древесины, различных стеблей растений (торфа, льна, камыша, соломы), а также газонаполненные пластмассы. Существует еще группа материалов, изготовляемых из смеси органического и неорганического сырья, например фибролит, получаемый из древесной шерсти и цемента, изделия из минеральной ваты на синтетическом связующем, высокопористые пластмассы, наполненные вспученным перлитом, особо легким керамзитом, и другие виды материалов. Их не выделяют в особую группу, а относят либо к неорганическим, либо к органическим материалам. Основанием для этого служит преобладание неорганической или органической части в таком материале. Например, минераловатные изделия на синтетическом или битумном связующих относят к неорганическим материалам, а фибролит — к органическим.

По форме и внешнему виду теплоизоляционные материалы подразделяют на штучные (плиты, блоки, кирпич, сегменты, полуцилиндры, цилиндры), рулонные (маты, полосы, матрацы), шнуровые (шнуры, жгуты), рыхлые и сыпучие (вата минеральная, стеклянная, огнеупорная, гранулированная вата, вспученные перлит и вермикулит, торфяная крошка, молотый диатомит, порошкообразные смеси, используемые для мастичной тепловой изоляции горячих поверхностей оборудования и трубопроводов).

Наиболее перспективными материалами являются штучные изделия, изготовляемые в заводских условиях по строго установленной технологии. Их качество контролируется соответствующими ГОСТами.

Устройство же тепловой изоляции из рыхлых и сыпучих материалов помимо существенного увеличения затрат ручного труда не гарантирует постоянство свойств набивной или засыпной изоляции в связи с уплотнением и разрушением материалов в период эксплуатации.

Основным направлением развития производства теплоизоляционных материалов является расширение выпуска высококачественных крупноразмерных жестких изделий, применение которых в наибольшей степени способствует повышению уровня индустриализации строительного производства.

По структуре теплоизоляционные материалы подразделяют на волокнистые, ячеистые и зернистые.

По средней плотности в сухом состоянии, кг/м^3, теплоизоляционные материалы подразделяют на группы и марки.

I группа — особо легкие материалы (ОЛ), имеющие марки 15, 25, 35, 50, 75 и 100; II группа — легкие (Л) — 125, 150, 175, 200, 225, 250, 300 350; III группа — тяжелые (Т) — 400, 450, 500 и 600. Материалы с промежуточным значением средней плотности относят к ближайшей большей марке.

По жесткости теплоизоляционные изделия подразделяют на виды, исходя из относительной деформации сжатия под удельной нагрузкой (табл. 3.1).

Таблица 3.1. **Классификация изделий по жесткости**

Вид изделий	Относительное сжатие, %, при удельной нагрузке, МПа		
	0,02	0,04	0,1
Мягкие	Более 30	—	—
Полужесткие	От 6 до 30	—	—
Жесткие	До 6		
Повышенной жесткости	—	До 10	—
Твердые	—	—	До 10

По теплопроводности теплоизоляционные материалы и изделия делят на классы: малотеплопроводные [λ до 0,058 Вт/(м·°С)]; среднетеплопроводные [λ=0,058...0,116 Вт/(м·°С)] и повышенной теплопроводности [λ=0,116...0,18 Вт/(м·°С)]. Для подразделения на классы значения теплопроводности материалов определяют при температуре 25 °С.

По возгораемости теплоизоляционные материалы подразделяют на три группы: несгораемые, трудносгораемые и сгораемые.

3.2. Классификация акустических материалов

Данная классификация построена на принципе функционального назначения этих материалов. По этому принципу акустические материалы подразделяют на:

а) звукопоглощающие, предназначенные для применения в конструкциях звукопоглощающих облицовок внутренних помещений и для отдельных звукопоглотителей для снижения звукового давления в помещениях производственных и общественных зданий;

б) звукоизолирующие, применяющиеся в качестве прокладок (прослоек) в многослойных ограждающих конструкциях для улучшения изоляции ограждений от ударного и воздушного звуков;

в) вибропоглощающие, предназначенные для ослабления изгибных колебаний, распространяющихся по жестким конструкциям (преимущественно тонким) для снижения излучаемого ими звука.

В данном курсе рассматриваются первые две группы материалов, так как по своей структуре и технологии изготовления они близки к теплоизоляционным материалам. Это обстоятельство явилось методологическим обоснованием для изучения технологии изготовления теплоизоляционных, звукопоглощающих и звукоизоляционных материалов и изделий в рамках одной учебной дисциплины.

Звукопоглощающие материалы в соответствии с действующим стандартом классифицируются по следующим основным признакам: эффективности, форме, жесткости (величине относительного сжатия), структуре и возгораемости.

По форме звукопоглощающие материалы и изделия подразделяют на штучные (блоки, плиты); рулонные (маты, полосовые

прокладки, холсты); рыхлые и сыпучие (вата минеральная и стеклянная, керамзит, вспученный перлит и другие пористые зернистые материалы).

По жесткости эти материалы и изделия подразделяют на мягкие, полужесткие, жесткие и твердые.

По структурным признакам звукопоглощающие материалы и изделия подразделяют на пористо-волокнистые, пористо-ячеистые (из ячеистого бетона и перлита) и пористо-губчатые (пенопласты, резины).

По возгораемости, как и все строительные материалы, акустические материалы и изделия подразделяют на три группы: несгораемые, трудносгораемые и сгораемые.

Сравнивая классификационные признаки звукопоглощающих, а также теплоизоляционных материалов и изделий, можно видеть их общность, что лишний раз подчеркивает идентичность задач при производстве этих материалов. Однако следует отметить, что для придания высоких показателей функциональных свойств рассматриваемым материалам и изделиям необходимо применять различные технологические приемы, позволяющие образовывать нужную для того или иного случая пористую структуру.

По эффективности звукопоглощающие материалы и изделия подразделяют на три класса: 1-й класс — α свыше 0,8; 2-й класс — α от 0,8 до 0,4; 3-й класс — α от 0,4 до 0,2. В основу такого деления положена величина среднеарифметического реверберационного* коэффициента α, которой характеризуется материал в каждом из диапазонов частот, указанных в табл. 3.2.

Таблица 3.2. **Классификация частоты октавных полос**

Наименование диапазона частот	Обозначение диапазона частот	Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц
Низкочастотный	Н	100, 125, 160, 200, 250, 315
Среднечастотный	С	400, 500, 630, 800, 1000, 1250
Высокочастотный	В	1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000

Звукоизоляционные материалы подразделяют на штучные (ленточные, полосовые и штучные прокладки, маты, плиты) и сыпучие (керамзит, доменный шлак, песок).

По структуре звукоизоляционные изделия (материалы) подразделяют на пористо-волокнистые, изготовляемые из минеральной и стеклянной ваты в виде мягких, полужестких и жестких прокладочных изделий со средней плотностью от 75 до 175 кг/м³ и динамическим модулем упругости $E_д$ не более 0,5 МПа при нагрузке 0,002 МПа; пористо-губчатые, изготовляемые из пенопластов и пористой резины и характеризующиеся $E_д$ от 1,0 до 5,0 МПа. Динамический модуль упругости зернистых засыпок не должен превышать 15 МПа.

* *Реверберация* — послезвучание, наблюдающееся после выключения источника звука.

Таким образом, звукопоглощающие и звукоизоляционные материалы должны обладать повышенной способностью поглощать и рассеивать звуковые волны.

Кроме того, звукопоглощающие и звукоизоляционные материалы и изделия должны обладать стабильными физико-механическими и акустическими свойствами в течение всего периода эксплуатации; быть био- и влагостойкими; не выделять в окружающую среду вредных веществ.

Звукопоглощающие изделия, как правило, должны обладать высокими декоративными свойствами, так как их одновременно используют и для отделки внутренних поверхностей ограждений зданий.

ГЛАВА 4

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

К любым строительным материалам предъявляется комплекс требований функционального (специфического) и строительно-эксплуатационного характера. Например, к материалам для полов основным требованием функционального характера является низкая истираемость. Наряду с этим данные материалы должны отвечать общестроительным требованиям: соответствовать стандартам по форме и размерам, цвету, прочности и т. д.

Соответствие любого строительного материала предъявляемым к нему требованиям оценивается по его качеству, которое определяется совокупностью показателей его свойств.

В соответствии с требованиями свойства строительных, в том числе теплоизоляционных и акустических, материалов и изделий подразделяются на функциональные и общестроительные или строительно-эксплуатационные.

Таким образом, функциональные свойства определяются основным назначением материала.

Для теплоизоляционных материалов такими свойствами являются теплоизолирующая способность (теплопроводность) и температура применения, для звукопоглощающих материалов — величина звукопоглощения, для звукоизоляционных материалов — способность гасить звуковые волны, характеризуемая динамическим модулем упругости и относительным сжатием при кратковременной и длительной нагрузках.

К функциональным свойствам теплоизоляционных и акустических материалов и изделий следует отнести пористость, величина и структурные показатели которой решающим образом влияют на качество этих материалов.

Строительно-эксплуатационные свойства характеризуют материалы с позиции их транспортирования, монтажа и эксплуатации. Важнейшими из них для теплоизоляционных и аустических материалов являются прочность, стойкость к действию воды, температуры, огня, химической и биологической агрессии. Для звукопоглощающих материалов немаловажным показателем является декоративность.

Применяя различные технологические приемы, можно в каких-то пределах направленно изменять эти свойства. Однако это не должно существенно отражаться на функциональных свойствах материалов и изделий.

4.1. Функциональные свойства теплоизоляционных материалов и изделий

Теплопроводность — важнейшая характеристика теплоизоляционных и теплоизоляционно-конструкционных материалов. Размерность теплопроводности — Вт/(м·К) или Вт/(м·°С).

В литературе можно встретить старую размерность теплопроводности — ккал/(м·ч·°С). Соотношение между старыми и международными единицами теплопроводности таково: 1 Вт/(м·°С) = =0,86 ккал/(м·ч·°С) или 1 ккал/(м·ч·°С) = 1,163 Вт/(м·°С).

Из основного закона распространения теплоты путем теплопроводности, установленного Фурье, следует, что

$$\lambda = \frac{Q\delta}{(F\tau\Delta t)}, \quad (4.1)$$

где Q — количество теплоты; δ — толщина материала; F — площадь сечения, перпендикулярная тепловому потоку; τ — время прохождения теплового потока; Δt — разность температур на противоположных стенках материала.

Исходя из современных представлений о природе теплопередачи, Дебай преобразовал выражение теплопроводности:

$$\lambda = c\omega l, \quad (4.2)$$

где c — удельная теплоемкость тела при постоянном объеме; ω — скорость распространения волн; l — средняя длина свободного пробега волны (по аналогии с кинетической теорией газов).

Это выражение Дебая справедливо с определенными поправками для твердых, жидких и газообразных тел и позволяет объяснить различную теплопроводность материалов в зависимости от их агрегатного состояния и строения.

На практике теплопроводность определяют экспериментально с помощью малоинерционного тепломера и рассчитывают по результатам измерений температурного градиента за определенный интервал времени в процессе нагрева образца.

В настоящее время сделаны небезуспешные попытки создания расчетных методов определения теплопроводности, учитывающих агрегатное состояние, структуру веществ и условия окружающей среды. Эти методы применяют главным образом для прогнозирования теплопроводности при создании новых материалов с заданными свойствами.

Теплопроводность, Вт/(м·°С), различных материалов колеблется в очень широких пределах, например: 0,024 — для воздуха в неподвижном состоянии при 0 °С и 0,075 при 1000 °С; 0,55 — для воды при 0 °С и 0,7 при 100 °С; 2,5 — для льда; 0,11...0,17 — для дерева; 0,45...0,8 — для керамического кирпича; 45...60 — для стали и чугуна; 418 — для серебра, т. е. теплопроводность воздуха почти в 18 тыс. раз ниже, чем серебра.

При этом следует отметить, что даже небольшие изменения химического состава веществ и их физического состояния приводят к существенному различию значений теплопроводности и, следовательно, требуют их учета.

Теплопроводность материалов зависит от следующих факторов:

физического состояния и строения, которые определяются фазовым состоянием вещества; степенью кристаллизации и размерами кристаллов; анизотропией кристаллов и направлением теплового потока; объемом пористости материала и характеристиками пористой структуры;

химического состава и наличия примесей, которые особенно влияют на теплопроводность кристаллических тел;

условий эксплуатации материала, которые определяются температурой, давлением, влажностью, наличием радиационного облучения, интенсивностью съема теплоты с холодной поверхности материала.

Влияние каждого из указанных факторов не равнозначно.

Значительное влияние на теплопроводность оказывает физическое состояние тела. Чтобы объяснить это явление, кратко рассмотрим механизм теплопроводности в твердых телах, жидкостях и газах с позиции квантовой теории. В этой теории предполагается, что колебания нормального вида квантуются по аналогии с фотонами в теории света. Эти кванты называют фононами.

В твердых телах передача теплоты осуществляется путем взаимодействия между тепловыми упругими колебаниями решетки или вследствие движения электронов и столкновения их с атомами. В металлах имеют место оба вида передачи энергии, чем и объясняется их большая теплопроводность.

В неметаллах число свободных электронов, которые могли бы свободно двигаться по кристаллической решетке, незначительно, поэтому в них теплота передается главным образом за счет колебаний решетки. Если бы эти колебания были полностью гармоничными, то сопротивления переносу теплоты не было и теплопроводность была бесконечно велика. Однако в реальных телах колебания имеют ангармоничный характер. Ангармоничность колебаний

приводит к взаимодействию фононов между собой, эквивалентному рассеиванию фононов волнами, в результате чего теплопроводность значительно снижается.

Для описания процесса удобно использовать понятие длины свободного пробега волны в твердых телах и длины свободного пробега молекул в жидкостях и газах, в которых перенос теплоты осуществляется вследствие столкновения молекул с различной кинетической энергией.

Таким образом, величина l, входящая в уравнение Дебая (4.2), для твердых тел равна длине свободного пробега фононов, а для жидкостей и газов — длине свободного пробега молекул. Тогда, рассматривая неметаллические тела кристаллического строения, можно объяснить влияние размера кристаллов, моно- и поликристаллических структур тел, наличия или отсутствия дефектов в решетке, направленности теплового потока по отношению к оптической оси кристалла, а в волокнистых материалах — к оси волокна на их теплопроводность.

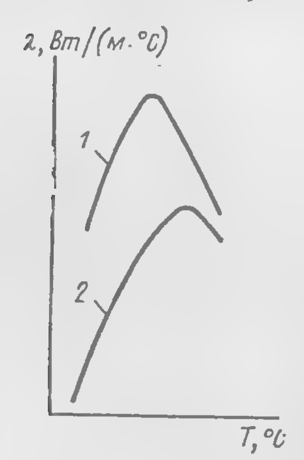


Рис. 4.1. Теплопроводность монокристалла и поликристаллов сапфира

Чем меньше длина свободного пробега фононов l, тем ниже должна быть теплопроводность тела, т. е. она должна снижаться с уменьшением размера монокристаллов, с увеличением дефектов кристаллической решетки, в телах, сложенных из разнородных кристаллов (в поликристаллических системах), при направленности теплового потока перпендикулярно оптической оси кристалла или оси волокна. Исследования показали, что все положения справедливы. Например, установлено, что теплопроводность примерно пропорциональна размеру кристалла (снижается по мере уменьшения размеров кристаллов), при направлении теплового потока вдоль оптической оси кристалла или вдоль волокон теплопроводность существенно больше, чем при перпендикулярной направленности (у кристалла кварца в диапазоне температур от —200 до 100°С почти в 2 раза; такое же положение имеет место в древесине и асбесте). На рис. 4.1 показана теплопроводность монокристалла *1* и поликристалла *2* сапфира.

На теплопроводность кристаллических тел значительное влияние оказывает температура; с ее понижением λ увеличивается. Следовательно, при повышении температуры теплопроводность таких тел падает (рис. 4.2) и наоборот.

Особенно заметное повышение теплопроводности наблюдается при отрицательных температурах, поэтому теплоизоляционные свойства материалов в этом случае резко ухудшаются (табл. 4.1).

Таблица 4.1. Теплопроводность кварца при различных температурах

Направление теплового потока	λ, Вт/(м·°С), при температуре, °С			
	—200	—100	0	100
Перпендикулярно оси кристалла	27	11,6	7,2	5,6
Параллельно оси кристалла	53,5	22	13,6	9

В стеклообразных материалах среднее расстояние действия упругой волны мало и равно лишь нескольким межатомным расстояниям. Поэтому их теплопроводность почти на порядок ниже, чем кристаллических. С повышением температуры в стеклообразных материалах длина свободного пробега фононов изменяется незначительно. Это объясняется тем, что при усилении тепловых колебаний увеличивается рассеивание фононов вследствие нерегулярного расположения атомов. Поэтому теплопроводность таких материалов с повышением температуры возрастает (рис. 4.3).

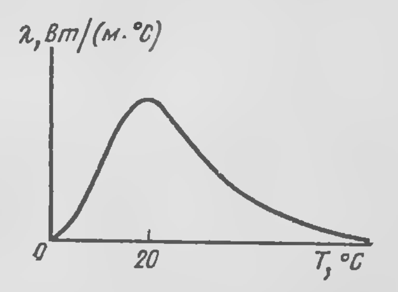


Рис. 4.2. Характер изменения теплопроводности монокристалла кварца в зависимости от абсолютной температуры

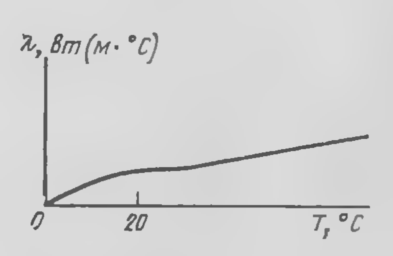


Рис. 4.3. Характер изменения теплопроводности аморфного кварца в зависимости от абсолютной температуры

Теплопроводность кристаллических тел можно понизить путем увеличения дефектов в их структуре или рекристаллизацией с уменьшением размера кристаллов и снижением их доли в материале. Например, радиоактивное облучение создает точечные дефекты в структуре кристаллов, а при интенсивном облучении вызывает переход от кристаллического к стеклообразному состоянию, что и является причиной уменьшения l и снижения теплопроводности.

Теплопроводность жидкости тем больше, чем выше ее удельная теплоемкость — один из параметров, входящих в уравнение Дебая. При повышении температуры расстояние между молекулами в жидкостях увеличивается, плотность их уменьшается, теплопроводность падает. Исключение составляют вода, тяжелая вода и глицерин. Чем ниже температура кипения жидкости (при нормальном давлении), зависящая от химического состава, тем быстрее умень-

шается теплопроводность с ростом температуры. Для различных жидкостей изменение теплопроводности колеблется в пределах 0,1...0,25% на 1 °C.

В газах с повышением температуры наблюдается повышение теплопроводности. Это связано с тем, что вязкость газов μ и удельная теплоемкость c_0 увеличиваются с повышением температуры, а между этими параметрами газов и теплопроводностью существует зависимость:

$$\lambda_{T_l}/\lambda_{T_0} = \mu_{T_l}/\mu_{T_0} \cdot c_{VT_l}/c_{1 \cdot T_0}. \tag{4.3}$$

Чем большее число атомов составляет молекулу газа, тем значительнее увеличение теплопроводности.

В соответствии с кинетической теорией газов их теплопроводность не должна зависеть от давления, если средняя длина свободного пробега молекул между последовательными соударениями очень мала. Однако это условие не выполняется при очень низком давлении, когда абсолютное давление стремится к нулю, или при высоком давлении (>1 МПа). В первом случае толщина газового слоя становится меньше длины свободного пробега молекул, во втором — она уменьшается.

Эти особенности эффективно используют в засыпной вакуумной изоляции холодильных установок путем применения мелкозернистых засыпок, в которых формируются очень малые воздушные прослойки. Поэтому когда давление газа понижают, то толщина газового слоя в промежутках между мелкими зернами становится мизерной и средняя длина пробега молекул может превышать расстояние между частицами. В таких условиях теплопроводность системы (зерна — воздух) ниже теплопроводности воздуха, заполняющего межзерновые поры, при обычном давлении. Происходит скачок температуры, который затрудняет передачу теплоты, как если бы толщина газового слоя возросла на величину того же порядка что и удвоенная средняя длина свободного пробега молекул. При этом с понижением давления уменьшается передача теплоты путем теплопроводности.

Химический состав веществ оказывает существенное влияние на их теплопроводность. Вещества, простые по химическому составу и строению, более теплопроводны, чем сложные. Например, MgO имеет большую теплопроводность, чем SiO_2 и Al_2O_3, еще меньшей теплопроводностью обладают $CaO \cdot SiO_2$; $2CaO \cdot SiO_2$ и муллит $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$.

Примеси, как правило, уменьшают теплопроводность веществ, даже если сами они более теплопроводны, чем основное вещество. В данном случае играет роль усложнение структуры веществ.

Это явление характерно для материалов с кристаллическим строением и слабее выражено у стекловидных веществ.

Теплопроводность газов зависит от их молекулярной массы и числа атомов в молекуле. С повышением молекулярной массы теплопроводность падает, поскольку между ними при прочих равных условиях существует следующая зависимость:

$$\lambda = 1/M^{1/2}. \tag{4.4}$$

С увеличением числа атомов в молекуле газа, т. е. с усложнением строения молекул, возрастает теплопроводность, в среднем этот прирост составляет 2% на каждый атом.

Таким образом, можно сделать вывод, что теплопроводность тел, находящихся в различных агрегатных состояниях, при прочих равных условиях увеличивается с повышением плотности, уменьшается с увеличением молекулярной массы, возрастает с повышением температуры кипения или плавления, с увеличением числа атомов становится меньше у кристаллических тел и больше у жидкостей и газов.

Поризация твердых материалов существенно снижает их теплопроводность. Известно, что наименьшей теплопроводностью обладают газы (воздух), находящиеся в спокойном, т. е. в неподвижном, состоянии, когда отсутствует конвективный перенос теплоты. В теплоизоляционном материале с мелкопористой структурой эти условия считаются обеспеченными, поэтому их теплопроводность тем ниже, чем больше доля пор в общем объеме материала (рис. 4.4).

На теплопроводность большое влияние оказывает вид пористой структуры материала. Наличие в материале сплошного каркаса из твердого вещества облегчает прохождение теплового потока, отсутствие такового оказывает большее сопротивление передаче теплоты.

Участками с наибольшим термическим сопротивлением при нормальной температуре являются поры, вследствие чего теплопередача наиболее интенсивно осуществляется по твердому каркасу теплоизоляционного материала при его наличии (в материале с ячеистой структурой). При отсутствии сплошного каркаса (в теплоизоляционных засыпках и волокнистых материалах) тепловой поток, проходя от одной твердой фазы к другой, сжимается вблизи места контакта этих частиц. При этом происходит интенсивное взаимодействие фононов друг с другом, что вызывает дополнительное термическое сопротивление. Из этого следует, что материалы с ячеистой структурой при одном и том же составе твердой фазы должны характеризоваться большей теплопроводностью, чем с волокнистой или зернистой структурами. Очевидно также, что уменьшение диаметра волокон и размера зерен увеличивает сопротивление материала теплопередаче, снижает его теплопроводность, так как в этом случае число контактов между элементами структуры возрастает, а размеры пор уменьшаются. Эти положения четко подтверждаются экспериментальными данными (рис. 4.4 и 4.5) и широко используются на практике.

Размер и форма воздушных включений оказывают большое влияние на теплопроводность материала. В реальных материалах форма пор в большинстве случаев отличается от сферической. По-

этому она оказывает влияние, особенно *при крупнопористой* структуре, на теплопроводность материала в зависимости от направления потока по отношению к расположению пор (воздушных прослоек).

В этом случае наименьшая теплопроводность материала имеет место при расположении воздушных прослоек (пор) перпендикулярно потоку теплоты. При этом стремятся уменьшить толщину и увеличить количество воздушных прослоек. При направленности теплового потока вдоль наибольшей оси воздушных включений термическое сопротивление мате-

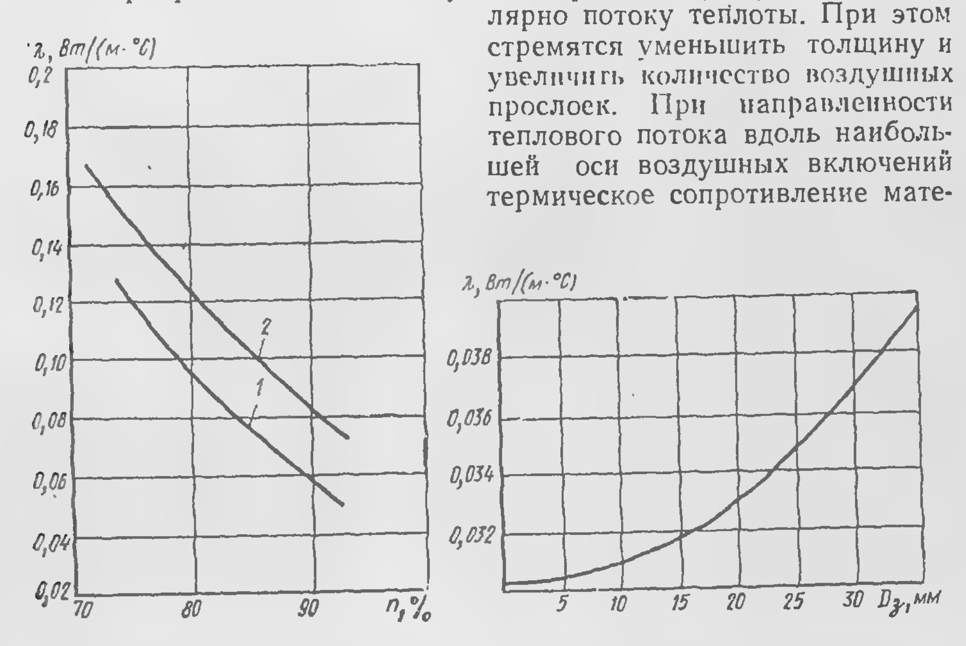


Рис. 4.4. Влияние пористости материала и ее вида на теплопроводность:

1 — минераловатные изделия; *2* — минеральные материалы с ячеистой структурой

Рис. 4.5. Влияние размера зерна стеклопора на теплопроводность засыпки

риала снижается, так как в этом случае лишь уменьшается полезное сечение теплопередачи.

Если же поры малы, то направление теплового потока незначительно отражается на изменении теплопроводности материала. Поэтому всегда стремятся создавать теплоизоляционные материалы, характеризующиеся равномерно распределенной мелкопористой структурой.

Ниже приведена зависимость между размером воздушных пор и теплопроводностью воздуха в них при $t = 10$ °С.

Величина пор, мм	0,1	1	2	4	5	8	10
λ, Вт/(м·°С) . .	0,026	0,029	0,038	0,041	0,044	0,053	0,063

Повышение теплопроводности воздуха по мере увеличения размера пор объясняется ростом вклада конвективного переноса теплоты. Особенно этот вид теплопередачи в воздушных порах возрастает при повышенных температурах. Так, с повышением температуры от 0 до 500 °С передача теплоты через поры диаметром 1 и 5 мм возрастает соответственно в 5,3 и 11,7 раза.

Характер пористой структуры (степень замкнутости пор) влияет на теплопроводность теплоизоляционных материалов неоднозначно. Это влияние проявляется по-разному, в зависимости от температуры среды. Кинетическая вязкость воздуха при снижении температуры с 350 до —100 °С уменьшается в 10 раз. Воздух становится более текучим, за счет чего облегчается его конвекция внутри пористого теплоизоляционного материала. Поэтому для устройства тепловой изоляции, эксплуатируемой при отрицательной температуре, предпочтительны материалы с мелкой замкнутой пористостью.

При невысоких положительных температурах воздух в теплоизоляционном слое расширяется и в случае открытой пористости частично вытесняется из материала. Поэтому для ограждающих конструкций, работающих при невысоких положительных температурах, целесообразно применять теплоизоляционные материалы с равномерно распределенной открытой пористостью. Но и в этом случае необходимо стремиться к уменьшению размеров пор.

При высоких температурах участвуют все три вида переноса теплоты. В данном случае конвекция существенно уменьшается в материалах с замкнутыми порами. Однако в таких материалах увеличивается передача теплоты излучением. Поэтому вопрос об оптимальной пористой структуре теплоизоляционного материала надо решать в зависимости от температурных условий службы с учетом превалирующего влияния того или иного вида теплопередачи, т. е. по результатам экспериментальных определений. Однако максимально возможное уменьшение размеров пор вне зависимости от их вида и в этом случае дает положительные результаты.

Теплоемкость — свойство материала поглощать теплоту при повышении температуры. Количественной характеристикой этого свойства материалов яляется *удельная теплоемкость* c, показывающая, какое количество теплоты надо сообщить 1 кг данного материала, чтобы повысить его температуру на 1 °С. Размерность удельной теплоемкости Дж/(кг·К) или Дж/(кг·°С).

Удельная теплоемкость материалов зависит от их природы и в значительно меньшей степени от объема пористости, что объясняется близкими абсолютными значениями c воздуха и большинства строительных материалов. Например, c воздуха и плотного бетона равна соответственно 1,04 и 0,92 кДж/(кг·°С). Удельная теплоемкость органических материалов значительно выше, чем минеральных. Так, у древесно-волокнистых плит она в 3,2 раза, у пенопластов в 1,8 раза выше, чем у минераловатных изделий.

Удельная теплоемкость жидкостей значительно выше, чем твердых и газообразных веществ. Для воды она составляет почти

2*

4 кДж/(кг·°С). Поэтому увлажнение материалов приводит к значительному повышению их теплоемкости.

В технологии строительных материалов вообще и теплоизоляционных материалов, в частности, в большинстве случаев применяют увлажненные формовочные массы и тепловую обработку отформованных изделий. В данном случае снижение водосодержания формовочных масс является эффективным фактором уменьшения энергозатрат на тепловую обработку. Это обстоятельство стремятся широко использовать на практике.

На эксплуатационные свойства теплоизоляционных материалов, особенно при стационарных тепловых режимах, удельная теплоемкость существенно не влияет. Но теплоемкость ограждений, зависящая не только от величины c материала, из которого она выполнена, сколько от массы этого материала в конструкции, играет существенную роль. Примером этому может служить конструкция стен периодически действующих обжиговых печей кирпичного производства.

В случае их исполнения из кирпичной кладки в соответствии с теплотехническим расчетом толщина стены принимается равной ~1,5 м. Следовательно, на 1 м³ стены расходуется 1,5 м³ кирпича, т. е. масса 1 м² стены составляет ~2,7 т. Применяя керамвол со средней плотностью 600 кг/м³, характеризующийся высокой теплоизолирующей способностью, уменьшают толщину стен печи до 0,3 м. При этом масса 1 м² стены уменьшается до 180 кг, т. е. в 15 раз. Учитывая незначительную разницу в значениях удельной теплоемкости для обоих материалов, можно считать, что теплоемкость стены из керамвола в 15 раз ниже теплоемкости стены из кирпича.

При периодическом режиме работы печи это обстоятельство существенно сказывается на расходе теплоты, потребной для нагревания ограждений печи до заданной температуры.

Предельная температура применения — это свойство теплоизоляционных материалов характеризуется величиной $t_п$, предельно допустимой для применения данного материала в условиях длительной эксплуатации. Эта температура несколько ниже температуростойкости материала, так как при ее назначении учитывают влияние деструктивных процессов, происходящих в материалах при длительном воздействии высоких температур. Так, в стеклообразных материалах (минеральной, стеклянной вате, ячеистом стекле и др.) в условиях длительного воздействия повышенных температур возможны образование и рост кристаллов, что приводит к резкому возрастанию внутренних напряжений в стекле вплоть до его разрушения. Направленно изменяя вещественный состав стекол, можно значительно повышать $t_п$.

В полимерных или полимерсодержащих материалах происходит температурная деструкция высокомолекулярных соединений (обрыв цепей, образование поперечных связей), в результате чего прочность и эластичность полимерного связующего резко ухудшаются. В материалах из гидравлических вяжущих, а также в асбестосодержащих материалах при длительном воздействии повышенных температур происходит дегидратация минерального вяжущего и асбеста, что приводит к сбросу прочности и повышению хрупкости изделий.

Для материалов из органического сырья (камышит, торфяные плиты, ДВП и т. п.) $t_п$ назначают с учетом возможности возгораемости материалов в процессе эксплуатации. Ее можно повысить введением в состав материалов антипиренов.

Значения $t_п$, °С, для некоторых теплоизоляционных материалов: минеральная вата — 600, стеклянная вата — 450, огнеупорная муллитокремнеземистая вата — 1150, пеностекло — 400, ячеистый бетон — 400...700, минераловатные изделия — 60...180, торфоплиты — 100, газонаполненные пластмассы — 60...180.

Пористость — одна из важнейших характеристик теплоизоляционных материалов, позволяющая оценивать долю (процентное содержание) газовой (воздушной) фазы в объеме материала. Принято подразделять пористость на истиную (общую), открытую и закрытую.

Истиная пористость характеризует отношение общего объема всех пор к объему материала (в долях или процентах):

$$П_и = П_з + П_к \text{ или} \qquad (4.5)$$

$$П_и = \left(\frac{\rho - \rho_{ср}}{\rho}\right) = \left(1 - \frac{\rho_{ср}}{\rho}\right) 100\,\%, \qquad (4.6)$$

где ρ и $\rho_{ср}$ — соответственно плотность и средняя плотность материала, кг/м³, г/см³.

Открытая пористость $П_к$ — отношение общего объема сообщающихся пор к объему материала (определяется экспериментально путем водонасыщения).

Закрытая пористость $П_з$, %, характеризует объем закрытых пор в объеме материала и рассчитывается исходя из формулы (4.6), т. е.

$$П_з = П_и - П_к. \qquad (4.7)$$

Для зернистых материалов (засыпной теплоизоляции) введено понятие пустотности $V_{п.м}$, %, которая характеризует объем межзерновой пористости:

$$V_{п.м} = (1 - \rho_н/\rho_{ср})\,100, \qquad (4.8)$$

где $\rho_н$ и $\rho_{ср}$ — соответственно насыпная и средняя плотность зерен материала.

В табл. 4.2 приведены значения пористости для теплоизоляционных материалов различной пористой структуры.

Объем истинной пористости определяется содержанием в материале каркасообразующих элементов (волокон, зерен, мембран, образующих межпоровые перегородки в ячеистых структурах), прочностью этих элементов и образованного ими каркаса. Чем вы-

Таблица 4.2. Значения пористости теплоизоляционных материалов

Структура	Материалы	Пористость, %		
		истинная	открытая	закрытая
Ячеистая	Ячеистый бетон	85 ... 90	40 ... 50	40 ... 45
	Пеностекло	85 ... 90	2 ... 5	83 ... 85
	Пенопласты	92 ... 99	1 ... 55	45 ... 98
Волокнистая	Минераловатные	85 ... 92	85 ... 92	0
Зернистая	Перлитовые	85 ... 88	60 ... 65	22 ... 25

ше прочность структообразующего материала и чем прочнее связи между элементами каркаса, тем больше может быть истинная пористость теплоизоляционного материала.

Для материалов с волокнистой и зернистой структурой значения истинной пористости не являются величинами постоянными, так как даже при небольшой нагрузке $П_и$ снижается за счет уплотняемости. После снятия нагрузки у волокнистых материалов возможно частичное восстановление $П_и$ за счет упругого последействия волокон.

В технологии теплоизоляционных материалов применяют ряд приемов для повышения $П_и$. Для материалов с волокнистой структурой это достигается путем уменьшения диаметра волокон до предела, обеспечивающего малую сминаемость минеральной ваты, снижением содержания связующего в материале за счет повышения его адгезионных и когезионных свойств, а также путем направленного ориентирования волокон по отношению к нагрузке при эксплуатации материала. Для материалов с зернистой структурой — применением зерен монодисперсного гранулометрического состава, повышением их прочности, увеличением внутризерновой пористости, снижением расхода связующего путем уменьшения его вязкости, поризацией связующего. Для материалов с ячеистой структурой — повышением прочности межпоровых перегородок и уменьшением их толщины.

Повышение общей пористости может быть также достигнуто конструкционными приемами, путем снижения эксплуатационной нагрузки на теплоизоляционный слой в конструкции.

Открытая пористость ухудшает эксплуатационные свойства теплоизоляционных материалов, являясь причиной проникновения влаги и газов в глубь изделий. Это способствует резкому повышению теплоемкости и теплопроводности теплоизоляции, интенсификации химической и физической коррозии твердой фазы.

Закрытая пористость обеспечивает повышенную эксплуатационную стойкость строительной теплоизоляции. При производстве теплоизоляционных материалов с ячеистой структурой $П_з$ стремятся увеличить. Это достигается оптимизацией процесса порообразования путем направленного регулирования его кинетики и реологических характеристик формовочных смесей.

Однако при устройстве высокотемпературной теплоизоляции предпочтение отдается материалам с волокнистой структурой, они намного лучше выдерживают резкие колебания температуры, так как элементы, слагающие их структуру, способны деформироваться без разрушения каркаса и релаксировать за счет этого температурные напряжения.

Размер и форма пор оказывают существенное влияние не только на теплопроводность теплоизоляционных материалов, но и на их прочностные характеристики. Снижение размера пор в материалах с любой структурой до определенного предела в зависимости от прочности и степени связности каркасообразующего материала является одним из эффективных приемов повышения прочности высокопористых изделий.

Форма пор также оказывает влияние на прочность теплоизоляционного материала. Наилучшие показатели по прочности имеют ячеистые и зернистые материалы со сферическими порами и зернами. Форма пор является причиной анизотропии свойств теплоизоляционных материалов. Материал с продолговатыми или эллиптическими порами неравнопрочен. Его прочность ниже при приложении нагрузки параллельно короткой оси. Для теплопроводности же наблюдается обратная зависимость.

4.2. Строительно-эксплуатационные свойства теплоизоляционных материалов

Средняя плотность $\rho_{ср}$, кг/м³, — физическая величина, определяемая отношением массы тела или вещества ко всему занимаемому ими объему, включая имеющиеся в них пустоты и поры:

$$\rho_{ср} = m_с/V, \qquad (4.9)$$

где $m_с$ — масса материала в сухом состоянии.

Среднюю плотность материала в естественно-влажном состоянии определяют по формуле

$$\rho_{ср\cdot вл} = \frac{m_в}{V(1+0{,}01W)}, \qquad (4.10)$$

где W — влажность материала; $m_в$ — масса материала в естественно-влажном состоянии.

Средняя плотность материалов в сухом состоянии прямо пропорциональна объему пористости, и с ее помощью приближенно оценивают теплопроводность. При прочих равных условиях по средней плотности можно судить и о прочности теплоизоляционных материалов, конечно, в сугубо приближенном виде.

Физико-механические свойства характеризуют прочность и деформативность теплоизоляционных материалов, т. е. общестроительные качества.

К прочностным показателям относят прочности при сжатии $R_{сж}$, изгибе $R_и$ и растяжении $R_р$. Как правило, значение этих показателей не велико и зависит от многих факторов: вида пористой структуры, прочностных показателей, формы и пространственного расположения каркасообразующих элементов структуры. Вид пористой структуры в значительной мере предопределяет способность материала воспринимать тот или иной вид нагружения.

В связи с этим стандарты регламентируют проведение испытаний теплоизоляционных материалов на один или несколько показателей прочности. Так, материалы с волокнистой структурой испытывают на изгиб и реже на растяжение, с зернистой и ячеистой структурами — на сжатие и реже на изгиб.

Прочностные показатели наиболее распространенных теплоизоляционных материалов приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3. **Прочностные показатели распространенных теплоизоляционных материалов**

Материалы	Средняя плотность, кг/м³	Прочность, МПа, при	
		сжатии	изгибе
Ячеистый бетон	350	0,6	—
Пеностекло	200	1,0	0,7
Минераловатные плиты на синтетическом связующем	200	—	0,1
Асбестосодержащие	350	—	0,17 ... 0,3
Перлитобитумные	300	—	0,15
Перлитоцементные	300	0,8	0,25
Керамические	400	0,8	—
Древесно-волокнистые плиты	300	—	0,12
Фибролит	400	—	0,7
Пенопласты	25	0,07	0,1
	50	0,1	0,1
	100	0,2 ... 0,4	—

В современной технологии теплоизоляционных материалов применяют ряд приемов, обеспечивающих повышение прочности. Эти приемы будут рассмотрены при изучении технологии конкретных теплоизоляционных материалов.

К физико-механическим свойствам следует отнести сжимаемость материала $C_{сж}$. Этот показатель характеризует уплотняемость материала, %, под действием сжимающих сил. Его используют для определения жесткости теплоизоляционных материалов (см. табл. 3.1). Сжимаемость является характерным показателем для теплоизоляционных материалов с волокнистой пористой структурой.

Отношение теплоизоляционных материалов к действию воды. Наличие воды в теплоизоляционных материалах всегда ухудшает их функциональные и строительно-эксплуатационные свойства. У влажных материалов резко повышаются теплопроводность и теплоемкость, у большинства из них снижаются физико-механические показатели. Поэтому снижение влажности является важным фактором улучшения всех свойств теплоизоляции. Отношение теплоизоляционных материалов к действию воды, как и всех строительных материалов, оценивается несколькими показателями.

Влажность характеризуется отношением массы (объема) влаги, содержащейся в объеме материала, к его массе в сухом состоянии (влажность по массе) или к его объему (объемная влажность).

Показатель влажности по массе ($W_в$) существенно зависит от средней плотности материала, с ее уменьшением $W_в$ растет и для теплоизоляционных материалов может достигать значений намного больше 100%. Поэтому удобнее пользоваться объемной влажностью $W_{об}$, дающей наглядное представление о степени увлажненности материала.

Для перехода от влажности по объему к влажности по массе, пользуются зависимостью

$$W_в = 1000 W_{об}/\rho_{ср}. \quad (4.11)$$

Увлажнение материалов происходит при контакте с водой или воздухом. Свойства материала поглощать (сорбировать) влагу из окружающего воздуха называют *гигроскопичностью*, а достигаемое при этом увлажнение — *сорбционной* или *равновесной влажностью*.

Гигроскопичность зависит от природы материалов, характера пористой структуры, величины поверхности пор, а также от относительной влажности воздуха. При прочих равных условиях гигроскопичность выше у тех теплоизоляционных материалов, в структуре которых больше мелких капилляров, так как в них выше капиллярная конденсация паров воды. Снижение гигроскопичности теплоизоляционных материалов достигают путем их объемной гидрофобизации, уменьшения содержания микропор, защиты поверхности изделий обкладочными материалами или затирочными растворами.

Свойство материала увлажняться при соприкосновении одной из поверхностей с водой называют *капиллярным подсосом* (насыщением). Величина капиллярного подсоса главным образом зависит от пористой структуры материала и смачиваемости его водой. Чем больше капиллярных пор, тем выше при прочих равных условиях этот показатель. Крупные поры в процессе капиллярного подсоса не участвуют.

Способность материала впитывать и удерживать воду характеризует его *водопоглощение*. Водопоглощение имеет место при погружении материала в воду. По объему оно всегда меньше объема пористости теплоизоляционного материала, а по массе — часто превышает 100%. Водопоглощение зависит от вида и характера пористой структуры и смачиваемости твердой фазы водой. Например, водопоглощение по объему и массе ячеистых материалов с закры-

той пористостью (пеностекло) составляет соответственно 2...15 и 80...120%, с сообщающейся пористостью (перлит) — 30...40 и 350...400%; для материалов с волокнистой структурой водопоглощающая способность равна 80...85 и 400...650%.

Коэффициент размягчения $K_{разм}$ характеризует влияние влаги на строительные свойства материалов и прежде всего на их прочность:

$$K_{разм} = R_{нас}/R_{сух}. \qquad (4.12)$$

Однако этот показатель непригоден для многих теплоизоляционных материалов, так как насыщение водой приводит к необратимым изменениям их структуры. Например, минераловатные изделия при этом уплотняются и резко снижают теплоизоляционные свойства, древесно-волокнистые плиты набухают и теряют форму. Поэтому их отношение к действию воды оценивают комплексно.

Морозостойкость характеризует способность материалов в насыщенном водой состоянии выдерживать многократное попеременное замораживание и оттаивание. Этот показатель оценивается числом циклов, которое для различных теплоизоляционных материалов устанавливается соответствующими нормативными документами.

Отношение теплоизоляционных материалов к действию высоких температур. Группа показателей, характеризующих поведение теплоизоляционных материалов при воздействии на них высоких температур, позволяет оценить эффективность применения их в тех или иных условиях службы.

Термическая стойкость — способность материалов выдерживать резкое многократное нагревание и охлаждение. Количественно измеряется числом циклов и характеризует продолжительность службы материалов в периодически действующих тепловых агрегатах. Этот важный показатель у теплоизоляционных материалов зависит главным образом от вида их пористой структуры. В связи с тем что теплопроводность их значительно меньше, чем плотных материалов, то разница температур на горячей и холодной сторонах равновеликих изделий будет значительно больше. Следовательно, и величина температурных напряжений, определяемая расширением материала при нагревании и уменьшением объема при охлаждении, будет намного выше. Если же учесть, что высокопористое строение теплоизоляционных материалов предопределяет невысокую прочность, то становится ясным, что у большинства теплоизоляционных материалов термическая стойкость невысока.

Особенно низка она у материалов с жестким ячеистым каркасом, например, получаемых пеновым способом. Наличие в структуре дефектов (микротрещин) способствует частичной релаксации температурных напряжений и, как следствие, повышению термической стойкости материалов. Такое строение характерно для керамических теплоизоляционных материалов, получаемых способом выгорающих добавок. Наиболее высокой термической стойкостью обладают материалы, в которых элементы твердой фазы, составляющие пористый каркас, имеют возможность свободно деформироваться при нагревании и охлаждении. Это прежде всего материалы на основе огнеупорных волокон. Их термическая стойкость в десятки, а иногда в сотни раз превышает тот же показатель материалов с ячеистой структурой и гораздо выше термостойкости плотных материалов. Для повышения термостойкости стремятся применять материалы с меньшими значениями коэффициента линейного температурного расширения (ТЛКР), который зависит от природы применяемого сырья.

Огнеупорность — свойство материала противостоять, не деформируясь и не расплавляясь, длительному воздействию высоких температур. Огнеупорность зависит только от вещественного состава материала, т. е. от огнеупорности минералов, составляющих этот материал, и их соотношения в нем. Огнеупорность является важным признаком для определения предельной температуры применения теплоизоляционного материала.

Температура начала деформации под нагрузкой — показатель, определяющий предельную температуру применения материала. Она соответствует температуре 4%-ной деформации материала под удельной нагрузкой, которая для теплоизоляционных материалов принимается, как правило, в соответствии с их средней плотностью. Температура начала деформации под нагрузкой всегда ниже огнеупорности и с повышением пористости снижается.

Горючесть — способность материала выдерживать без разрушения действие высоких температур и открытого пламени. Горючесть характеризуется степенью возгораемости строительных материалов. По степени возгораемости все строительные материалы, в том числе и теплоизоляционные, делят на три группы: несгораемые, трудносгораемые, сгораемые.

К несгораемым материалам относят все неорганические теплоизоляционные материалы. Материалы из органического сырья относят к группе сгораемых. Негорючесть материалов повышают введением в их состав минеральных компонентов, пропиткой антипиренами, покрытием огнезащитными составами. Модифицированные таким образом материалы и изделия относят к группе трудносгораемых материалов.

4.3. Функциональные и строительно-эксплуатационные свойства акустических материалов и изделий

Функциональные свойства акустических материалов определяются их назначением и областью применения.

Звукопоглощающие материалы предназначены для гашения воздушных шумов и регулирования акустических характеристик помещений, поэтому они должны обладать хорошим звукопоглощением, которое характеризуется среднеарифметическим реверберационным коэффициентом звукопоглощения α, называемым часто просто коэффициентом звукопоглощения.

При падении звуковой волны на ограждающую поверхность часть звуковой энергии отражается и часть поглощается материалом. Коэффициент звукопоглощения представляет собой отношение, характеризующее количество поглощенной энергии $E_{погл}$ к падающей $E_{пад}$:

$$\alpha = (E_{пад} - E_{отр})/E_{пад} = E_{погл}/E_{пад}, \quad (4.13)$$

где $E_{отр}$ — энергия отраженной звуковой волны.

На величину α оказывают влияние уровень и характеристика звука (шума), свойства звукопоглощающего материала и в первую очередь характер и объем пористости этого материала, конструктивные особенности устройства звукопоглощающей облицовки ограждения.

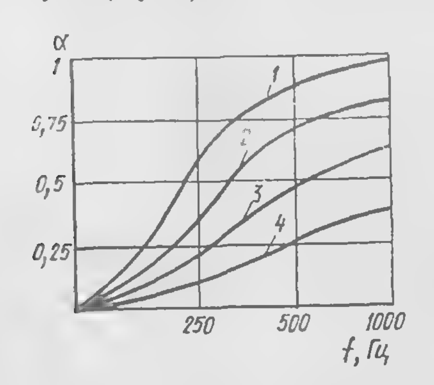


Рис. 4.6. Влияние частоты звуковых волн на коэффициент звукопоглощения волокнистых материалов с различной пористостью:

1 — 95%; 2 — 50%; 3 — 25%; 4 — 15%

Решающее влияние на звукопоглощение оказывает частота звуковой волны, т. е. один и тот же материал может хорошо поглощать высокочастотный звук и плохо низкочастотный. Поэтому α определяют для каждого материала при нескольких значениях частот (см. табл. 3.2). Весьма существенное влияние на α оказывают общий объем и характер пористости.

Наилучшие условия для поглощения звука создаются в материалах с сообщающейся пористостью. Для уменьшения количества отраженной энергии пористость звукопоглощающего материала должна быть открытой. С возрастанием частоты звука α одного и того же материала возрастает. При этом в диапазоне высоких частот его значения несколько снижаются. Наименьшим значением α звукопоглощающие материалы характеризуются в диапазоне низких частот (ниже 250 Гц). Низкочастотные волны в материал почти не проникают.

На рис. 4.6 приведено влияние на α общей пористости и частоты звуковых волн в низко- и среднечастотном диапазонах.

Выявлено, что высокочастотные волны лучше проникают в поры малых размеров без значительного отражения.

В табл. 4.4 приведены значения коэффициента звукопоглощения наиболее распространенных акустических материалов.

Материалы, значения α которых более 0,4 при частоте 1000 Гц, относят обычно к эффективным.

Выше было отмечено, что высокочастотные волны хорошо поглощаются порами малых размеров. Макропоры фибролита нельзя отнести к таковым. Однако малые поры в большом количе-

Таблица 4.4. Значения α некоторых акустических материалов

Материал	Значения λ на частотах, Гц				
	125	500	1000	2000	4000
Плиты минераловатные	0,05	0,66	0,91	0,96	0,89
Плиты ячеистобетонные	0,08	0,36	0,62	0,77	0,76
Акустический фибролит	0,06	0,25	0,38	0,58	0,63

стве имеются в древесной шерсти, из которой фибролит изготовляют. Этим и можно объяснить достаточно высокие значения α при высоких частотах. Отсюда следует, что для эффективного гашения высокочастотного звука надо не только создавать мелкопористую структуру в акустическом материале, но и применять для его изготовления сырьевые материалы, характеризующиеся большим объемом естественных пор малых размеров.

Эффективность звукопоглощающих материалов часто оценивают по косвенным показателям, которыми являются структурный фактор ϰ и сопротивление материала продуванию постоянным потоком воздуха r при постоянном давлении.

Структурный фактор зависит от объема, вида и расположения пор. Для высокопористых материалов ϰ всегда больше единицы. Близкими к единице значениями ϰ характеризуются волокнистые материалы (минеральная и стеклянная вата, мягкие изделия из них и др.). Значения структурного фактора, близкие к 4, характерны для твердых акустических материалов средней плотности (ячеистые бетоны, акустические штукатурки, пеногипс и др.). Повышение значений ϰ связано с увеличением плотности акустических материалов и понижением их звукопоглощающих свойств.

Сопротивление продуванию r также зависит от объема, вида и размера пор, а главное — от соотношения объемов открытой и закрытой пористости. Сопротивление продуванию обычно определяют в стационарных условиях при постоянном потоке воздуха Q, м³/с, и постоянной разности давлений Δp. Удельное сопротивление продуванию, Н·с/м³, находят по формуле

$$r = \Delta p F / Q\delta, \quad (4.14)$$

где δ и F — соответственно толщина и площадь образца.

Сопротивление продуванию достаточно хорошо характеризует звукопоглощение материала. При значениях r, близких к волновому сопротивлению воздуха $[r = (1...2)\rho_0 C_0]$*, звукопоглощающий материал при достаточной толщине хорошо поглощает звуковые волны низких и средних частот. Хорошее поглощение высокочастотного звука обеспечивается при некотором повышении плотности

* Волновое сопротивление воздуха $\rho_0 C_0$, где ρ_0 — плотность воздуха; C_0 — скорость распространения звука в воздухе.

(рис. 4.7).

Значения структурного фактора $\varkappa$, пористости П и сопротивления продуванию используют для определения толщины звукопоглощающего материала, так как она существенно влияет на частотную характеристику звукопоглощения.

Для этого пользуются следующими установленными зависимостями:

$$h = 800/\sqrt{r \Pi f} \qquad (4.15)$$

или

$$h = 120\sqrt{\varkappa}/(r\Pi), \qquad (4.16)$$

где f — среднее значение частоты звуковых волн.

Весьма большое влияние на эффективность звукопоглощения оказывает расположение звукопоглощающего материала относительно жесткой поверхности, перед которой его устанавливают.

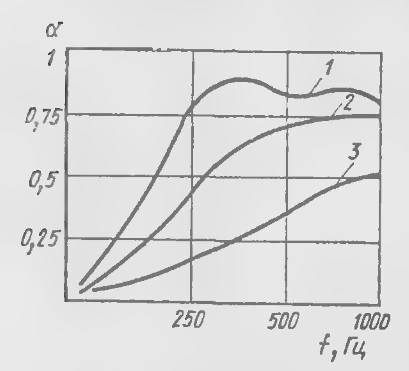


Рис. 4.7. Коэффициент звукопоглощения акустических материалов с различными значениями удельного сопротивления продуванию:
$1 - 2$; $2 - 8$; $3 - 32\rho_0 C_0$

Возможны два варианта установки звукопоглотителя: с относом и без относа от жесткой стенки. Принципиальное отличие этих двух вариантов заключается в том, что при отсутствии относа гашение звука происходит лишь в толще материала. Так как звукопоглощающие материалы имеют обычно толщину несколько сантиметров, то в этих условиях гасятся лишь высокочастотные звуковые волны.

При монтаже звукопоглотителя с относом звуковая волна проходит последовательно его толщу, затем воздушный зазор, который играет роль упругой прокладки, отражается от жесткой поверхности ограждения и вторично попадает в материал. При такой схеме гашения звука большая часть звуковой энергии гасится, даже если толщина звукопоглощающего материала незначительна. Наиболее эффективные звукопоглощающие материалы толщиной 2 см при монтаже с относом 20 см практически полностью поглощают звуковую энергию падающих волн.

Расположение звукопоглощающего материала с относом не только увеличивает гашение звука, но и качественно изменяет частотную кривую звукопоглощения (рис. 4.8).

Независимо от вида материала увеличение относа сдвигает эффект звукопоглощения в область низких частот, т. е. в область наиболее трудногасящихся звуковых волн.

Для определения резонансной частоты звукопоглощающей конструкции установлена следующая зависимость:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\rho C^2}{m\delta}}, \qquad (4.17)$$

где $\rho C/\delta$ — упругое сопротивление воздушного промежутка на единицу поверхности при толщине δ, см; m — масса звукопоглощающей конструкции на единицу поверхности, кг/м².

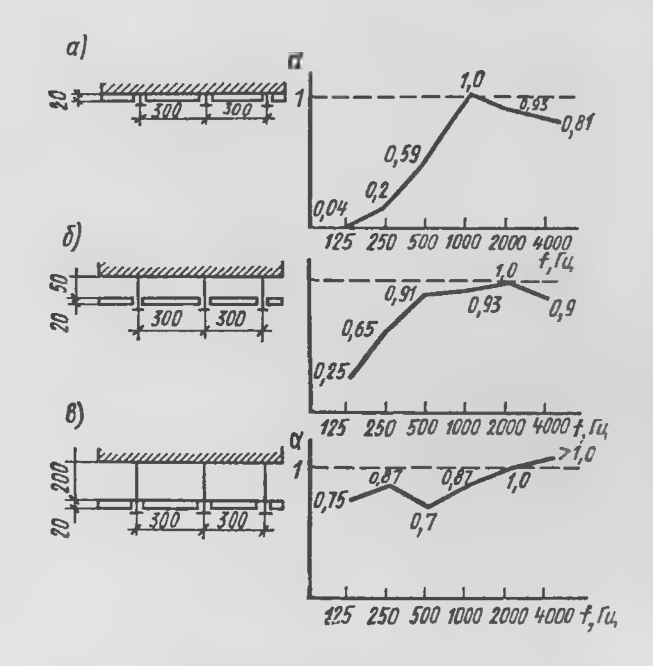


Рис. 4.8. Влияние схемы монтажа звукопоглощающих материалов на частотную кривую звукопоглощения:

а — монтаж плит без относа; *б* — то же, с относом 50 мм; *в* — то же, с относом 200 мм

При подстановке значений C и ρ для воздуха формула примет вид

$$f = 600/\sqrt{m\delta}. \qquad (4.18)$$

Пользуясь этой зависимостью, можно определить рациональную массу 1 м² звукопоглощающего материала при различных значениях относа. Расчеты и практика показывают, что увеличение массы конструкции ведет к снижению резонансной частоты. Такое же явление наблюдается и при увеличении воздушного относа.

Характер фактурной поверхности звукопоглощающих материалов оказывает существенное влияние на звукопоглощение. Для лучшего проникновения звуковых волн в материал на его лицевой

поверхности делают круглую или щелевую перфорацию, борозды, трещины.

Декоративно-акустические материалы, предназначенные одновременно и для отделки помещений, часто окрашивают. При этом существенно уменьшается открытая пористость и, как следствие, снижается звукопоглощение на высоких частотах.

Главную характеристику звукопоглощающих материалов и изделий — коэффициент звукопоглощения α — определяют расчетным путем по волновым параметрам материала и экспериментальными методами с помощью акустического интерферометра или в реверберационной камере. Такие определения и расчеты выполняют обычно в специализированных лабораториях.

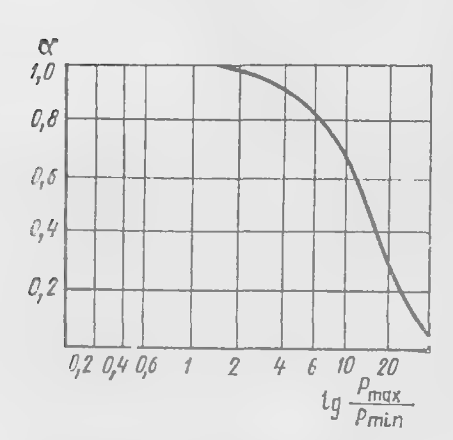


Рис. 4.9. Зависимость коэффициента звукопоглощения α от соотношения уровня звукового давления при максимуме и минимуме стоячей волны

Для первичной оценки звукопоглощающих свойств материала пользуются акустическим интерферометром, с помощью которого определение коэффициента звукопоглощения основано на измерении разности уровней звукового давления при максимуме и минимуме стоячей волны, которая возникает при наложении прямой и отраженной звуковых волн:

$$\Delta h = 20 \lg \frac{P_{max}}{P_{min}}. \qquad (4.19)$$

Значения коэффициента звукопоглощения α по Δh находят по графику (рис. 4.9).

Реверберационный способ определения коэффициента звукопоглощения материалов позволяет характеризовать звукопоглощение материалов в условиях, весьма близких к реальным. Поэтому среднеарифметический реверберационный коэффициент звукопоглощения принят в нормативных документах в качестве основной характеристики звукопоглощающих свойств материалов и применяется при акустических расчетах помещений. Его значение определяют в реверберационной камере.

Реверберационный способ основан на том, что при внесении в помещение любого предмета или материала общее звукопоглощение в этом помещении увеличивается. Определение ведут по изменению скорости затухания звука. Время, в течение которого уровень звука в помещении понизится на 60 дБ, называют временем стандартной реверберации. По соотношению времени реверберации до и после внесения определенного объема материала в камеру находят реверберационный коэффициент звукопоглощения исследуемого материала.

[illegible] ценки звукоизолирующих свойств материалов. Звукоизоляционные свойства материалов тесно связаны с их упругими деформациями: способностью уплотняться и восстанавливать первоначальные размеры при постоянной и переменной нагрузках.

Статический модуль упругости применяют для приблизительной оценки звукоизоляционных свойств материалов. Он характеризует связь между напряжением σ и соответствующей ему деформацией ε, появляющейся под действием силы, приложенной к испытуемому материалу. Эта связь описывается законом Гука: $\sigma = E\varepsilon$ и, следовательно,

$$E = \sigma/\varepsilon, \qquad (4.20)$$

где E — статический модуль упругости.

Динамический модуль упругости $E_д$ дает более точную характеристику и поэтому принят в нормативных документах за основной показатель звукоизоляционных свойств материалов.

Дело в том, что деформации в материалах зависят от множества факторов. Так, для упруговязких тел зависимость между σ и ε имеет вид

$$E_{ст} = \sigma/(\varepsilon_0 + \varepsilon_{пд} + \varepsilon_п), \qquad (4.21)$$

где ε_0 — чисто упругая деформация; $\varepsilon_{пд}$ — деформация упругого последействия; $\varepsilon_п$ — необратимая деформация (ползучесть).

Из этой формулы следует, что на значение $E_{ст}$ влияет момент измерения, следовательно, $E_{ст}$ — величина переменная.

Установлено, что статический модуль упругости звукоизоляционных материалов, полученный в момент стабилизации осадки материала, может отличаться от начального модуля упругости в 3...5 раз.

При измерении статического модуля упругости значительное влияние на деформацию оказывают значения напряжений, средняя плотность, толщина материала, время действия нагрузки.

При действии на упруговязкий материал, к которому относят все звукоизоляционные материалы, периодически действующей силы (звуковых волн) деформация не успевает следовать за возмущением вследствие упругого последствия. Модуль упругости, найденный в момент действия нагрузки ($\varepsilon_0 \neq \varepsilon_{ст}$), называют мгновенным или динамическим $E_д$. Он наиболее точно отражает деформативные процессы, происходящие в материале под воздействием звуковых волн.

Звукоизоляционные материалы в конструкции могут находиться в свободном состоянии (в стенах, перегородках) и в нагруженном (прокладки под полы, в стыках и т. п.). От этого существенно зависят значения динамического модуля упругости $E_д$ (рис. 4.10).

Динамический модуль упругости звукоизоляционных материалов в зависимости от их вида не должен превышать 5 МПа при

удельной нагрузке 0,002 МПа для штучных изделий и 15 МПа для зернистых засыпок.

Относительная дефомация сжатия. Звукоизоляционные свойства прокладочных материалов приближенно можно оценивать по относительной сжимаемости материалов под нагрузкой без учета поперечного расширения, т. е. по линейной деформации материала:

$$\varepsilon = (l_1 - l_2)/l_1 \cdot 100 = \Delta l/l_1 \cdot 100. \quad (4.22)$$

У эффективных звукоизоляционных материалов основная доля деформации отмечается при нагрузке до 0,002 МПа.

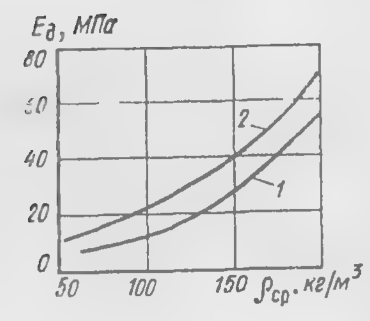


Рис. 4.10. Зависимость динамического модуля упругости волокнистых плит от средней плотности и статической нагрузки:
1 — 2 кПа; *2* — 4 кПа

Таким образом, функциональные свойства звукопоглощающих материалов оценивают коэффициентом звукопоглощения, а звукоизоляционных материалов — их плотностью для случая изоляции помещений от наружных шумов, распространяющихся в воздушной среде (чем плотнее материал, тем выше его отражающая способность и тем эффективнее защита от воздушного шума), и динамическим модулем упругости в случае изоляции ударных и структурных шумов (чем ниже значения этого показателя, тем эффективнее звукоизоляционный материал).

Строительно-эксплуатационные свойства акустических материалов в основном оценивают по тем же показателям, которые применяют для оценки строительно-эксплуатационных свойств теплоизоляционных материалов: по механической прочности; деформации при колебаниях температуры и влажности; стойкости при воздействии влаги, высокой температуры, огня, микроорганизмов и т. д. Поэтому в данном разделе эти свойства не рассматриваются. Однако необходимо подчеркнуть, что подавляющее большинство акустических материалов, как и теплоизоляционных, для обеспечения стабильности функциональных свойств требует надежной защиты от увлажнения.

ГЛАВА 5

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОЙ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В предыдущей главе было показано превалирующее влияние вида, характера пористости и ее общего объема на функциональные и строительно-эксплуатационные свойства теплоизоляционных и акустических материалов.

При получении теплоизоляционного материала всегда стремятся увеличить общий объем пористости и при этом создать мелкопористую структуру с равномерным распределением пор в объеме материала. На практике существует достаточно большое количество приемов, позволяющих в той или иной степени направленно регулировать как объем, так и характер структуры пористости. Однако необходимо знать пределы, к которым следует стремиться и которые обеспечивают заданные функциональные и прочностные свойства материалов.

Решающее влияние на максимально достижимый объем пористости оказывает вид пористой структуры, а на характеристику пористой структуры влияют объем пористости, технологические параметры и способы производства материала. Любое производство, в том числе и рассматриваемых материалов, нельзя оценить только по показателям свойств готовой продукции. В оценку обязательно входят технико-экономические показатели, главнейшими из которых являются: материалоемкость, трудоемкость, энергоемкость единицы продукции, из которых в основном складывается ее себестоимость.

Рассмотрим теоретические принципы формирования трех основных видов пористой структуры: ячеистой, волокнистой и зернистой.

5.1. Формирование оптимальной ячеистой структуры теплоизоляционных материалов и изделий

Общая пористость материала с ячеистой структурой образуется из ячеистой пористости (макропористости) и пористости межпоровых перегородок (микропористости). На долю ячеистой пористости приходится примерно 90% от общего ее объема. Рассмотрим, каков же максимальный общий объем ячеистой пористости возможен в реальных материалах.

Объем ячеистой пористости определяется пространственным расположением пор (их упаковкой), распределением пор по размерам, максимальным и средним размером пор, их формой, толщиной межпоровых перегородок. Наибольшие значения пористости при сферической форме пор достигаются в условиях геометрически правильной их укладки (упаковки), к которой относятся кубиче-

ская и гексагональная. Известно, что при плотных кубических или гексагональных упаковках шаров (сферических пор) любого одинакового диаметра в условиях их соприкосновения (рис. 5.1) предельный объем, %, ячеистой пористости составит:

$$П_{куб} = [(ПD/6)/D^3]\,100 = 52{,}4; \tag{5.1}$$

$$П_{гекс} = [(ПD^3/6)/(2\sqrt{2}D^3/2)]\,100 = 74{,}05. \tag{5.2}$$

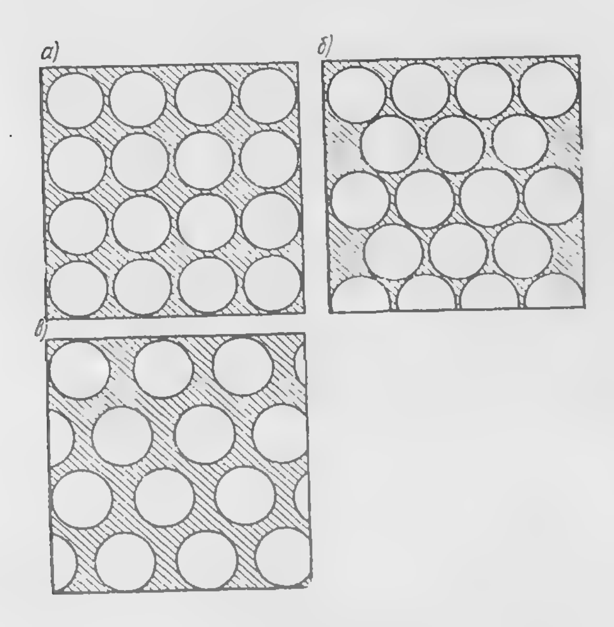


Рис. 5.1. Характер плотной упаковки сферических пор одного диаметра:

а — кубическая упаковка; *б* — гексагональная упаковка; *в* — гексагональная упаковка при наличии несущего каркаса

В этом случае минимальная средняя плотность полимерных материалов составит 330 кг/м³, а минеральных — 735 кг/м³, т. е. она значительно выше допустимой для теплоизоляционных и акустических изделий.

Но при ячеистой структуре в условиях соприкосновения пор, т. е. при отсутствии межпоровых перегородок, существование материала невозможно. С учетом этого формулы (5.1) и (5.2) преобразовываются и принимают вид:

$$П_{куб} = 0{,}524\,[(D/D+\delta)]^3\,100; \tag{5.3}$$

$$П_{гекс} = 0{,}74\,[D/D+\delta)]^3\,100, \tag{5.4}$$

где δ — толщина межпоровой перегородки в ее наиболее тонком сечении.

Таким образом, наличие перегородок, а также отклонение от идеальной гексагональной схемы упаковки пор (искажение укладки) в реальных материалах существенно уменьшают значения ячеистой пористости. Увеличение диаметра пор приводит к некоторому повышению объема пористости за счет уменьшения числа межпоровых перегородок и наоборот. Однако в крупных порах заметно возрастает конвективный теплообмен и теплопроводность такого

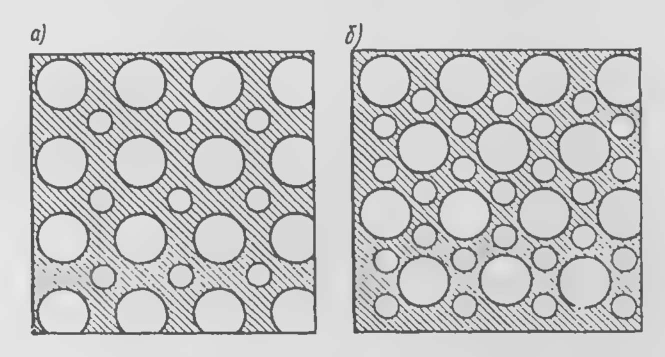


Рис. 5.2. Упаковка пор сферической формы в бинарную решетку:

а — с раздвижкой крупных пор (объемно-центрированная кубическая упаковка); *б* — без раздвижки крупных пор с размещением мелких пор в межузловом пространстве

материала, несмотря на возрастание объема газовой фазы, не снижается. Кроме того, его прочностные характеристики падают.

Принципиально возможно увеличение объема пористости путем изменения характера пористой ячеистой структуры и межпоровых перегородок. Для этого необходимо иметь в материале поры различных размеров. Полидисперсный характер распределения пор по размерам при определенных условиях обеспечивает высокую вероятность равномерного размещения пор меньших размеров между порами бóльших диаметров (рис. 5.2). В этом случае для материалов с последовательно убывающим размером пор от D до d при определенном отношении d/D и количественном соотношении пор всех размеров решетки постепнно переходят из одномерных (кубических или гексагональных) в бинарные, тройные, четырехмерные n-мерные. При этом предел пористости возрастает.

При условии равномерного распределения пор всех диаметров:

$$D;\ (\sqrt{2}-1)\,D;\ (\sqrt{6}/2-1)\,D \text{ и } (2\sqrt{3}/3-1)\,D$$

и при их количественном соотношении 1 : 1 : 1 : 1 — может быть достигнут наибольший объем пористости. Дальнейшее уменьшение d/D, т. е. переход к n-мерной решетке, дает ничтожно малый прирост пористости.

В табл. 5.1 приведены значения ячеистой пористости в зависимости от ее структуры.

Таблица 5.1. Предельные значения ячеистой пористости и средней плотности материалов при сферической недеформированной пористости

Вид упаковки	Вид решетки	Максимальные значения пористости		Минимальные значения средней плотности, кг/м³, при наличии перегородок, выполненных из	
		при соприкасающихся порах	при наличии перегородок	полимерного материала	неорганического материала
Кубическая	Одномерная	52,4	47,5 / 49,3	570	1290
	Четырехмерная	80,9	73,7 / 76,1	260	600
Гексагональная	Одномерная	74,05	67,3 / 69,6	330	735
	Четырехмерная	81,2	73,8 / 76,3	250	590

Примечание. Над чертой приведены данные для материалов на минеральном вяжущем, под чертой — на полимерных.

Таким образом, в случае идеального распределения пор в четырехмерной гексагональной решетке достигается предел объема ячеистой пористости:

$$П_я = 812\,[D/(D+\delta)]^3\,100. \qquad (5.5)$$

Повышенная пористость полимерных материалов, равно как и их пониженная средняя плотность, объясняется возможностью создания более тонких межпоровых перегородок, а также меньшей плотностью полимерного материала

В реальных материалах реализация строгого распределения пор по размерам невозможна. Обычно содержатся поры с размерами от d до D, а их количественное соотношение строго не выдерживается и зависит от множества факторов, главным образом технологического характера. Поэтому реальные материалы только за счет полидисперсности макропор не могут иметь величину ячеистой пористости, характеризующуюся предельными значениями.

Однако промышленность производит высокопористые материалы ячеистой структуры, как полимерные (пенопласты), так и неорганические (газобетон, пеностекло), которые характеризуются значительно меньшей средней плотностью и, следовательно, большей пористостью, чем значения этих показателей, представленные в табл. 5.1. Это обстоятельство можно объяснить с позиций деформации пор, т. е. изменением их формы. Рассмотрим этот вопрос несколько подробнее.

Если бы поры одинакового размера были идеально деформированы в форму правильных многогранников (рис. 5.3, *а*), то при сотовом строении

$$П = [D/(D+\delta)]^3\,100, \qquad (5.6)$$

т. е. объем пористости определялся бы толщиной перегородки (рис. 5.3, *б*). В этом случае толщина межпоровой перегородки зависит от размера частиц твердой фазы и плотности упаковки этих частиц.

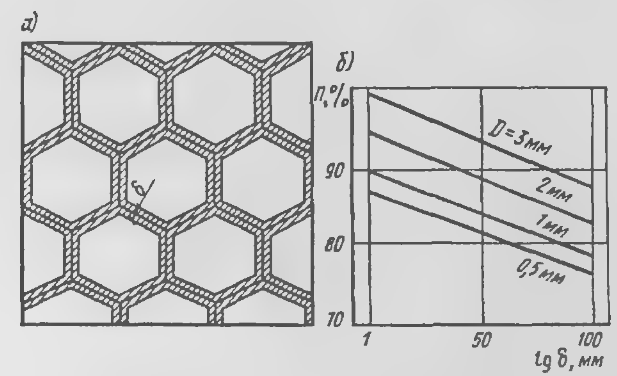


Рис. 5.3. Сотовая пористая структура:

а — схема упаковки пор; *б* — зависимость объема пористости материала от толщины межпоровых перегородок δ и диаметра пор D

Например, наименьший размер частиц характерен для полимерных композиций, промежуточный — для глиняных и наибольший — для цементно-песчаных материалов. При этом необходимо отметить, что в реальных материалах образование перегородки толщиной в одно зерно маловероятно, а если такая перегородка и образуется, то прочность и устойчивость ее минимальны.

Следовательно, для создания тонких и прочных перегородок, т. е. для снижения плотности материала с сотовой структурой, есть лишь один путь — уменьшение размера зерен вяжущего и заполнителя. Например, для ячеистых бетонов, если предположить, что в межпоровых перегородках зерна песка окружены зернами цемента, то минимально возможная толщина перегородок может достигать значений, приведенных в табл. 5.2.

В реальных материалах толщина перегородок значительно выше приведенной в табл. 5.2, так как не достигается плотная упаковка зернистых частиц вследствие их угловатости и шероховатости. Этому же препятствует наличие воды затворения в составе смеси. В результате в перегородках формируется разветвленная сеть микропористости, состоящей из капилляров и гелевых опор. Объем капиллярной пористости определяют по формуле

$$П_{кап} = 0{,}001\,(В - W_i \alpha Ц), \qquad (5.7)$$

Таблица 5.2. **Минимально достигаемые значения толщины межпоровых перегородок в ячеистом бетоне в условиях плотной упаковки**

Цемент		Песок		Сочетание зерен	Толщина перегородок, мкм
$S_{уд}$, см²/г	d, мкм	$S_{уд}$, см²/г	d, мкм		
3500	20	2000	50	ЦПЦ ЦПЦПЦ	90 160
3500	20	3000	30	ЦПЦ ЦПЦПЦ	70 120
3500	20	4000	15	ЦПЦ ЦПЦПЦ	55 90

где В и Ц — соответственно расход воды и цемента; W_i — количество воды, связанное цементным гелем химически и физико-химически; α — степень гидратации, составляющая для автоклавного ячеистого бетона в среднем 0,65.

Гелевую пористость рассчитывают по формуле

$$П_{гел} = 0{,}001 j \alpha Ц, \qquad (5.8)$$

где j — объем адсорбционно связываемой гелем воды, равной примерно 0,2.

В теплоизоляционных ячеистых бетонах объем капиллярной пористости составляет 5...12%, гелевой — 1,5...2,5%. Чем выше средняя плотность бетона, т. е. чем толще перегородки или чем их больше, тем больше воды, выше $П_{кап}$ и $П_{гел}$.

Несмотря на то что капиллярные и гелевые поры увеличивают на 7...15% общую пористость материала, негативное влияние этих пор на функциональные и строительно-эксплуатационные свойства ячеистого материала весьма велико.

В основном они определяют гигроскопичность материала, существенно влияют на прочность и коэффициент конструктивного качества. С ростом объема этих пор увеличиваются водопоглощение и равновесная влажность материала, при этом возрастает его теплопроводность и снижается прочность. Таким образом, снижение капиллярной пористости является существенным резервом повышения качества материалов с ячеистой пористой структурой.

Сравнивая формулы (5.5) и (5.6), можно заметить, что сотообразное строение пористости позволяет существенно, примерно на 19%, увеличить ячеистую пористость. Однако создание такой пористой структуры в реальных материалах, исключая сотопласты, нереально. Тем не менее на практике получают ячеистые бетоны с общей пористостью до 92%, при этом их средняя плотность составляет 200 кг/м³. Это можно объяснить применением высокодисперсного сырья, некоторым увеличением средней крупности пор, их частичной самопроизвольной деформацией в многогранники, наличием

значительного объема сообщающихся пор и, конечно же, учетом микропористости, имеющейся в твердой фазе.

При получении таких особо легких ячеистых бетонов идут на снижение их прочности, но выигрывают в материало- и энергоемкости при их производстве, в теплопроводности в случае применения таких материалов в строительной теплоизоляции, т. е. при обычных температурах, или в повышении звукопоглощения при использовании их в качестве акустических покрытий.

Межпоровые перегородки в материале с ячейистой структурой должны быть не только тонкими, но и близкими между собой по толщине. Различие межпоровых перегородок по толщине существенно снижает прочность материала. Разрушение наиболее тонких (слабых) перегородок влечет за собой перераспределение нагрузок на оставшиеся более прочные перегородки. Эта нагрузка в ячеистых структурах возрастает по гиперболическому закону. Поэтому чем больше различия в толщине межпоровых перегородок, тем значительнее недобор прочности материалом при прочих равных условиях.

На прочность поризованного материала оказывает влияние и характер внутренней поверхности воздушных пор, т. е. припорового слоя, толщина которого для минеральных систем составляет 15... 30 мкм, а для полимерных — от 1 до 10 мкм. Из-за отсутствия четких критериев оценки состояния припорового слоя используют условную градацию: рваная (рыхлая), гладкая (ровная) и глянцевая (высокоплотная) поверхность.

В зависимости от условий формирования ячеистой структуры припоровый слой может быть более рыхлым, чем основной материал межпоровой перегородки (рваная поверхность), равнопрочным (гладкая поверхность) и более плотным и прочным (глянцевая поверхность). В последнем случае припоровый слой выполняет роль подкрепляющей зоны, аналогично густоармированной зоне в железобетонных арках и оболочках. Рыхлый же припоровый слой ослабляет сечение межпоровой перегородки. Экспериментально установлено, что формирование глянцевого припорового слоя существенно повышает прочность материала при прочих равных условиях и в тем большей степени, чем выше пористость материала.

Необходимо также отметить, что деформация пор, т. е. отклонение от сферической формы, во всех случаях ведет к снижению прочностных показателей ячеистых материалов. Однако деформация мелких пор в правильные многогранники незначительно влияет на прочность и применительно к теплоизоляционным материалам с позиций теплопроводности и прочности, т. е. с позиций комплексной оценки материала, правомерно говорить об оптимальной пористой структуре с такой характеристикой пористости.

Таким образом, для теплоизоляционных материалов *оптимальной ячеистой структурой* следует считать равномерно распределенную в виде полидисперсных по размеру, замкнутых, деформированных в правильные многогранники пор с глянцевой поверхностью

припорового слоя, разделенных тонкими плотными, одинаковыми по сечению межпоровыми перегородками. Для получения такой оптимальной ячеистой структуры необходимо оптимизировать следующие ее характеристики.

Однородность распределения пористости в объеме материала. Этот параметр может быть оценен средним квадратичным отклонением (дисперсией) от среднего значения пористости $\sigma\{\Pi\}$ или коэффициентом вариации $V_0^{\text{п}}$. Экспериментально установлено, что для ячеистых теплоизоляционных бетонов $\sigma\{\Pi\}$ изменяется от 3 до 11%, причем с повышением пористости дисперсия, как правило, увеличивается.

Равномерность распределения пористости в поризованных системах подчиняется статистическим законам. Известны также направленные закономерности распределения пористости в изделиях. Например, пористость в горизонтальных сечениях возрастает от периферийных зон к центральной (сказывается «пристенный эффект»), в вертикальных же сечениях рост пористости наблюдается снизу вверх (сказывается давление верхнележащих слоев).

Однородность распределения пористости зависит от однородности смеси и прежде всего от равномерности распределения порообразователя; однородности температурного поля и реологических характеристик по ее объему; величины «пристенного эффекта», тормозящего вспучивание массы; кинетики изменения пластично-вязких свойств поризуемой массы; высоты формуемого изделия и других технологических факторов. Учет и направленное регулирование всех этих факторов позволяют существенно повысить однородность распределения пор в объеме материала. Значение $\sigma\{\Pi\}$ для эффективных теплоизоляционных материалов не должно превышать 5%.

Толщина межпоровых перегородок. Этот показатель объединяет три параметра: толщину перегородки в наиболее тонкой ее части, равномерность сечения перегородки по периметру поры (неоднородность сечения в пределах одной поры), неоднородность толщин перегородок в объеме поризованного материала.

Среднюю толщину межпоровой перегородки в материале с ячеистой структурой определяют дисперсность исходных компонентов и способ поризации. Толщина перегородки зависит от пористости плотности упаковки твердых частиц.

Равномерность сечения перегородки по периметру пор зависит от характера упаковки пор в объеме материала, степени и вида деформации пор, полидисперсности распределения пор по размерам. Этот параметр практически не поддается прямому регулированию. Однако установлено, что с увеличением объема пористости равномерность сечения перегородок повышается.

На неоднородность толщины перегородок в объеме материала влияют в первую очередь равномерность распределения в поризуемой смеси порообразователя, однородность температурного поля

(при газовом вспучивании) и однородность [illegible]

[illegible]

Наименьшие колебания толщины перегородок характерны для пенопластов, наибольшие — для ячеистых бетонов. Оценивают неоднородность толщины перегородок средним квадратичным отклонением толщины перегородки от среднего значения толщины всех перегородок $\sigma\{\delta\}$ или коэффициентом вариации этого параметра $V_0^{\text{п}}$. Для теплоизоляционного ячеистого бетона значение $\sigma\{\delta\}$ колеблется в пределах от 0,05 до 0,16 мм. Снижение значений этого показателя добиваются увеличением объема пористости, диаметра пор, уменьшением воды затворения (В/Т).

Реально достижимые толщины перегородок и неоднородность толщин в объеме материала составляют для теплоизоляционных полимерных материалов с ячеистой структурой соответственно 0,006...0,01 и $1...2\cdot10^{-3}$ мм, а для материалов из неорганического сырья — 0,09...0,12 и 0,04...0,07 мм.

Плотность межпоровых перегородок. Этот показатель определяется их пористостью, которая слагается из пористости, создаваемой водой затворения, и межзерновой пористости, характерной для неорганических материалов зернистого строения. Первый из этих двух факторов зависит от количества воды затворения (В/Т) или количества разбавителя, а также от доли жидкой фазы, связываемой в процессе твердения. Второй фактор определяется гранулометрическим составом твердых компонентов, формой зерен, шероховатостью их поверхности, а также реологическими характеристиками смеси и интенсивностью уплотнения.

Повышение плотности перегородок достигается: для полимерных систем — уменьшением количества разбавителя, наиболее полной полимеризацией системы; для минеральных систем гидратационного твердения — снижением В/Т, подбором оптимальной гранулометрии твердых компонентов, интенсивным уплотнением и обжатием перегородок; для минеральных систем, проходящих стадию пиропластического состояния, — оптимизацией тепловой обработки, обеспечивающей наиболее полное омоноличивание зернистых составляющих жидким расплавом.

С учетом сказанного возможно доведение плотности межпоровых перегородок почти до 100% для полимерных систем и до 74...78% для минеральных материалов гидратационного твердения.

Форма пор. Этот параметр характеризует степень деформирования сферических пор в правильные многогранники. Повышение объема ячеистой пористости системы, снижение поверхностного натяжения, повышение устойчивости массы, быстрая фиксация пористой структуры путем отверждения приводят к увеличению объема пор — многогранников. О степени деформирования пор можно судить по объему ячеистой пористости: если значение $\Pi_я$ превышает 75...80%, то это указывает на переход сферических пор в многогранники. Чем выше объем ячеистой пористости, тем более правильной формы должны быть многогранники.

Характер внутренней поверхности пор. Этот параметр отражает главным образом прочностные характеристики теплоизоляционных материалов. Необходимо стремиться к получению пор с плотной гладкой внутренней поверхностью. Этому способствуют следующие основные факторы: понижение поверхностного натяжения в период поризации массы; применение динамических воздействий (вибрации); быстрое закрепление образовавшейся пористой структуры, а также недопущение слишком интенсивного порообразования.

Практика показывает, что поризация минеральных композиций с помощью технической пены позволяет получать наиболее гладкую внутреннюю поверхность пор.

Замкнутость ячеистой структуры. Для теплоизоляционных материалов и изделий идеальной является пористая структура с замкнутыми ячейками. Однако в реальных материалах, выпускающихся промышленностью, характерно наличие дефектов ячеистой структуры, нарушающих замкнутость пор: «контактные дырки» и трещины в перегородках, возникающие из-за несоответствия скорости газообразования и темпа нарастания предельного напряжения сдвига и пластической вязкости массы; вертикально направленные каналы со значительным разрыхлением структуры в пристволыюй зоне канала (результат интенсивного порообразования или прорыва массы газами); поперечные и косые трещины в перегородках, образующиеся при транспортировании поризованной массы в формах с недостаточной жесткостью.

Наиболее трудноустранимый дефект — «контактные дырки». Он характерен для материалов с ячеистой структурой, получаемых методом газового вспучивания. Это связано с тем, что количество газообразователя при газообразовании в различных микрообъемах массы и порах неодинаковое, в результате чего в соседних порах возникает неравномерное давление. По мере роста перепада давления и уменьшения толщины перегородок создаются условия для прорывов стенки соседних пор и выравнивания давления. В результате образуется контактная дырка.

Трещины же возникают в массах, затвердевающих раньше окончания процесса газообразования. Поэтому этот дефект легко устраним путем изменения условий твердения и газообразования.

Применение способа пенообразования исключает практически полностью этот дефект ячеистой структуры, равно как и образование вертикально направленных каналов.

Анализ показывает, что дефекты ячеистой структуры теплоизоляционных материалов в подавляющем большинстве можно ликвидировать оптимизацией технологии и добиться получения пористой структуры ячеистого строения, близкой к идеальной. Для этого необходимо реализовать в промышленных условиях следующий комплекс технологических мероприятий.

Для минеральных систем гидратационного твердения: направленно регулировать реологические свойства и кинетику поризации массы, вводя поверхностно активные добавки и электролиты, изменяя температурный режим и применяя механические воздействия, оптимизируя гранулометрию и дисперсность твердых компонентов; снизить водотвердое отношение до значения, близкого к необходимому для гидратации вяжущего; создать условия для интенсивного уплотнения и обжатия твердой фазы материала.

Для минеральных систем, проходящих стадию пиропластического состояния: увеличить однородность распределения порообразователя в массе, оптимизировать его концентрацию в ней, а также дисперсность газообразователя; выбрать рациональные режимы тепловой обработки для достижения соответствия кинетики изменения реологических свойств массы и газовыделения в ней, а также условий для наиболее полного омоноличивания компонентов смеси и уменьшения остаточных напряжений в поризованном материале.

5.2. Оптимизация волокнистой структуры

Пористость теплоизоляционных волокнистых материалов складывается из межволокнистой пористости и пористости самих волокон. Подавляющее количество волокнистых теплоизоляционных материалов производится из волокон, пористость которых практически равна нулю (минеральных, стеклянных, муллитокремнеземистых). Поэтому применительно к ним оперируют понятием межволокнистой пористости, называя ее волокнистой. Поры в материалах с волокнистой структурой имеют неопределенную форму и представляют собой сообщающуюся систему воздушных полостей, в которой замкнутые поры отсутствуют.

Теплопроводность таких материалов во многом зависит от размера пор, определяющего вклад конвективного переноса теплоты. Уменьшение размеров пор достигают простым приемом — снижением диаметра волокон, ибо чем тоньше волокно, тем больше число волокон в единице объема материала (при постоянной массе твердой фазы) и, следовательно ниже конвективный теплоперенос. Кроме того, чем тоньше волокно, тем меньше площадь контакта между волокнами и тем больше этих контактов, что повышает сопротивление материала передаче теплоты. Поэтому для повышения теплоизоляционных свойств волокнистых материалов необходимо стремиться к уменьшению диаметра волокон.

Однако обеспечение необходимых строительно-эксплуатационных свойств волокнистых материалов такого типа ставит определенные ограничения этому фактору. Дело в том, что диаметр стекловидных волокон оказывает большое влияние на стабильность комплекса свойств волокнистых материалов. С одной стороны, уменьшение диаметра волокон приводит к повышению их прочности при разрыве. Это объясняется повышенной дефектностью поверхности более толстых волокон и в связи с этим большим проявлением эффекта Ребиндера, что предопределяет интенсивную потерю прочности толстыми волокнами во времени при их увлажнении. Это поло-

жение хорошо иллюстрируют данные Ю. А. Боброва, приведенные в табл. 5.3.

Таблица 5.3. **Влияние диаметра минеральных волокон на их прочность**

Показатели	Значения показателей при диаметре волокон, мкм		
	6 ... 8	10 ... 15	20 ... 25
Прочность при разрыве, МПа·10²	17 ... 15	13 ... 10	8 ... 6
Снижение прочности, %, при 36-суточном выдерживании волокон в воздушной среде с относительной влажностью 95%	4 ... 6	12 ... 14	28 ... 30

Установлено, что теплоизоляционные материалы, изготовленные из более тонких волокон, обладают лучшими теплофизическими и строительными свойствами, в том числе меньшей средней плотностью, большей упругостью, более высокой прочностью при изгибе и др.

Рис. 5.4. Влияние диаметра минерального волокна на среднюю плотность и теплопроводность минераловатных изделий

С другой стороны, существует некоторый предел, после которого уменьшение диаметра волокон негативно сказывается на эксплуатационных и теплофизических свойствах волокнистых материалов (рис. 5.4). Это объясняется снижением жесткости и упругости очень тонких волокон, их слеживаемостью в процессе эксплуатации и, следовательно, ростом средней плотности и снижением пористости. Следовательно, диаметр волокон подлежит оптимизации в зависимости от вида волокна и условий службы изделий в конструкции.

Сечение волокон должно быть круглым, так как в этом случае, во-первых, уменьшается масса твердой фазы в единице объема материала и, во-вторых, становится меньше площадь контактов между волокнами, что снижает теплопроводность через волокна. Волокна, применяющиеся для изготовления теплоизоляционных материалов, в подавляющем большинстве имеют круглое сечение или близкое к нему.

Вместе с тем существуют материалы, для изготовления которых применяют волокно эллиптического сечения и близкого к плоскому (некоторые виды огнеупорных волокон, древесная шерсть и т. п.).

По теплофизическим характеристикам оптимальна неровная (рыхлая) поверхность волокон, так как при этом еще больше уменьшается площадь контактов между волокнами. Особенно сильно это проявляется при высоких температурах. Однако рыхлый поверхностный слой снижает прочность и упругость волокон. Кроме того, при изготовлении изделий на связующем такая поверхность требует большего расхода связки, что приводит к увеличению средней плотности, теплопроводности и, как правило, повышению стоимости изделий.

Нерационально использовать волокна с резким перепадом толщины (с периодическим профилем). Такие волокна хотя и обеспечивают повышение прочности волокнистого ковра за счет зацепления волокон друг с другом, но вместе с тем вызывают преждевременное разрушение волокон по «ослабленному» сечению и ухудшение всех свойств материала.

Таким образом, оптимальной волокнистой структурой является структура с минимальным содержанием твердой фазы в виде длинных волокон малого диаметра, обеспечивающая упругость и неслеживаемость волокнистого каркаса при заданных нагрузках. Рациональная длина волокон определяется технологией изделий, а диаметр — прочностными и упругими свойствами волокна. Волокна должны быть круглого сечения с плотной гладкой поверхностью, без резкого перепада диаметра по всей их длине.

5.3. Оптимизация зернистой структуры

Пористость зернистых теплоизоляционных материалов и изделий складывается из межзерновой $П_{мз}$ и внутризерновой $П_{вз}$ пористости:

$$П_з = П_{мз} + П_{вз}. \quad (5.9)$$

У эффективных теплоизоляционных материалов соотношение между указанными видами пористости находится около 1 : 1. Внутризерновая пористость в большинстве случаев характеризуется ячеистой структурой. Она может быть замкнутой (гранулы пенополистирола, легкого вида керамзита) и открытой (перлит, вермикулит). Объем внутризерновой пористости можно рассчитать, исходя из средней плотности материала в куске:

$$\rho_{ср} = (100 - П_{вз})\rho/100, \quad (5.10)$$

отсюда

$$П_{вз} = (1 - \rho/\rho_{ср})\,100. \quad (5.11)$$

В материалах с замкнутой пористостью поры распределены неравномерно по объему зерна (гранулы). Наибольший объем пор и наибольший их размер характерны для центральной зоны зерна, наименьшие — для наружной зоны.

Объем межзерновой пористости (пустотности) зависит от гранулометрического состава и формы зерен и не зависит от их размера.

Чем однороднее по размерам зерна, тем выше $П_{мз}$. Полифракционные зернистые материалы характеризуются более плотной упаковкой и, следовательно, большей насыпной плотностью. Непрерывная гранулометрия в меньшей степени снижает межзерновую пустотность, чем прерывистая. Межзерновая пустотность — величина непостоянная и зависит от характера уплотнения, которое может иметь различную природу и осуществляться под действием внешней статической или динамической нагрузки, гравитационного давления лежащих выше слоев, электростатического притяжения, силы поверхностного натяжения.

Для реальных грубодисперсных систем (размер зерен более 0,1 мм) два последних фактора малозначительны.

В процессе механического (подпрессовка) или динамического (вибрация) воздействия зерна в теплоизоляционной засыпке смещаются в направлении более плотной упаковки. У малопрочных хрупких зерен при этом сминаются или скалываются выступы, препятствующие уплотнению; у пластичных материалов (пенополистирольные гранулы) происходит деформация, способствующая плотной укладке. В результате подпрессовки или вибрационного уплотнения межзерновая пустотность снижается с 45...50 до 25...32% у перлитов, до 33...37% у пенополистирола.

Влияние формы зерен на межзерновую пустотность однозначно оценить трудно. Принципиально наибольшую пустотность должны образовывать зерна одинакового диаметра сферической формы. Однако в силу зацепления зерен при укладке и неровности их поверхности пустотность засыпки из зерен неопределенной формы (перлит, вермикулит, пористый щебень) такая же, как в засыпках из шарообразных зерен (керамзит, стеклопор и т. п.), или даже несколько больше, главным образом за счет сводообразования.

Максимальная межзерновая пустотность сферических тел одного диаметра в условиях плотной упаковки может достигать 48%. В реальных системах за счет нарушения плотной упаковки и фракционного состава зерен, а также некоторого отклонения их от сферической формы эта цифра может несколько увеличиваться и уменьшаться и колебаться в пределах 40...50%. Для засыпок из щебня $П_{мз}$ колеблется от 43 до 48%.

Важнейшей характеристикой зернистой структуры, решающим образом влияющей как на теплофизические, так и на прочностные свойства, является размер зерен. Учитывая, что размер зерен не влияет на объем межзерновой пористости, предпочтительно использовать материал из зерен малого размера.

Во-первых, при малом размере зерен существенно уменьшаются межзерновые поры (пустоты), в результате чего затрудняется конвективный перенос теплоты. Во-вторых, уменьшаются площади контактов между зернами, вследствие чего увеличивается сопротивление теплопередаче. В порошках с размером частиц, равным долям микрометра, и с таким же малым размером пор на границе раздела газ — поверхность возникает значительный температурный скачок, [illegible] теплопроводность [illegible] газа, находящегося в межзерновых порах. В-третьих, увеличивается число контактов между зернами; из-за этого уменьшается разрушающее (пенетрирующее) действие каждого контакта — возрастает прочность системы на сжатие, а также повышается ее устойчивость (уменьшается сжимаемость материала в условиях эксплуатации под нагрузкой).

Положение меняется при переходе от теплоизоляционных засыпок к изготовлению штучных изделий. В данном случае для придания прочности изделиям необходимо применить вяжущее, с помощью которого создать омоноличенную по контактам между зернами структуру (способ контактного омоноличивания). При этом уменьшение размеров зерен (рост их удельной поверхности) требует увеличения расхода связующего и, следовательно приводит к повышению средней плотности и теплопроводности материала. Поэтому в этом случае рациональный зерновой состав подбирают экспериментально с учетом реологических свойств связующего и поверхностных характеристик заполнителя. Определяющими параметрами при этом служат средняя плотность, прочность и теплопроводность изделия.

Понятие «оптимальная зернистая пористость» бывает различным в зависимости от способа ее создания и условий эксплуатации. Следует различать два вида зернистой структуры: нестационарная зернистая структура, характерная для засыпной теплоизоляции; в этом случае контакт между зернами осуществляется только за счет механического трения; стабильная зернистая структура, присущая контактно-омоноличенному материалу, в которой контакт между зернами зафиксирован с помощью тонкой прослойки связующего.

Оптимальная нестационарная зернистая структура характеризуется высокопористыми мелкими зернами монофракционного состава. Форма зерен и характер их поверхности в этом случае не имеют первостепенного значения.

Оптимальная стабильная зернистая структура формируется из высокопористых зерен увеличенного размера и монофракционного состава со сферической формой и уплотненным поверхностным слоем.

5.4. Формирование оптимальной пористой структуры акустических материалов и изделий

Так же как для теплоизоляционных материалов, вид пористой структуры и характеристика пористости являются определяющими показателями качества для акустических материалов.

Их функциональные и строительно-эксплуатационные свойства тесно связаны с видом скелетообразующего материала и соответствующими ему технологическими приемами и параметрами получения того или иного пористого материала, позволяющими направленно изменять объем и характеристики пористости.

Формирование оптимальной пористой структуры звукопоглощающих материалов и изделий предопределяет эффективность звукопоглощающих конструкций. Свойства звукопоглощающих материалов и изделий и прежде всего звукопоглощение зависят от сообщающейся (сквозной) пористости, распределения пор по размерам, вида пор (волокнистые, ячеистые, зернистые).

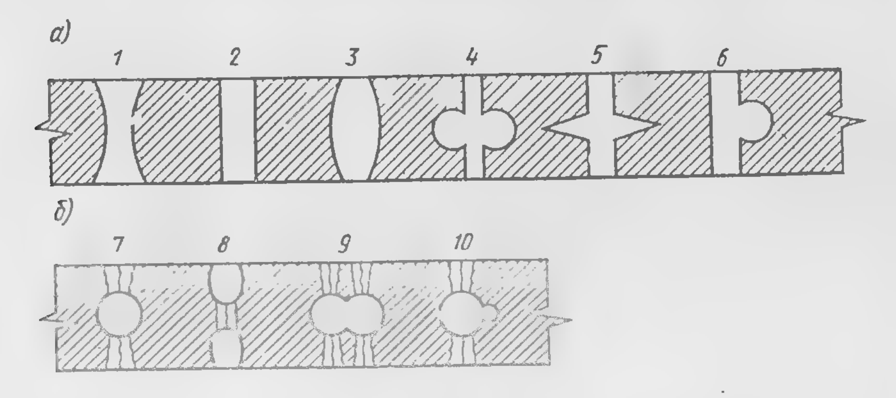


Рис. 5.5. Виды пор:

а — открытые; *б* — закрытые; *1* — гидравлически правильная пористость (зернистая структура); *2* — пористость с постоянным сопротивлением (волокнистая структура); *3* — гидравлически неправильная пористость (ячеистая структура); *1, 2, 3* — активная пористость; *4, 5, 6, 8* — виды полупассивных пор; *7, 9, 10* — пассивная пористость

Большое влияние на звукопоглощение оказывают вид пор на поверхности материала и характер пористости внутри его. По общепринятой классификации различают закрытые и открытые поры, замкнутую и сообщающуюся пористость. Основываясь на этой классификации и на физических явлениях гашения звуковых волн в высокопористых материалах, Б. М. Румянцев предложил подразделение пор на акустически активные и акустически пассивные (рис. 5.5). К акустически активным отнесены открытые поры, размеры которых соизмеримы с длиной звуковой волны. К акустически пассивным отнесены закрытые поры, не имеющие непосредственного выхода на поверхность материала. Сквозная пористость с тупиковыми порами и открытые несообщающиеся поры отнесены к категории полупассивных. Среди открытых пор выделены гидравлически правильные поры, характеризующиеся низкими значениями входного сопротивления (материалы с зернистой структурой); поры с постоянным сопротивлением (материалы с волокнистой структурой); гидравлически неправильные поры с высоким входным сопротивлением (материалы с ячеистой структурой). В соответствии с таким подразделением наименьшей звукопоглощающей способностью должны обладать материалы с ячеистой пористой структурой. Практика подтверждает это положение. Если учесть влияние структурного фактора χ и модуля объемной упругости воздуха в различных порах $\varkappa$, зависящего от характера пористости (полностью сквозная, сквозная с наличием тупиковых пор и т. п.), размеров пор и величины межпоровых ходов, то можно конкретизировать акустическую характеристику пор. При этом следует иметь в виду, что звукопоглощение материала увеличивается с приближением значений структурного фактора χ и модуля объемной упругости к единице и снижается при увеличении этих показателей. В этом случае подразделение пор по акустической активности с достаточной степенью достоверности можно характеризовать следующими показателями χ и $\varkappa$: для акустически активных и гидравлически правильных пор $\chi=1$; $\varkappa=1$; для пор с постоянным сопротивлением $\chi=2...3$, $\varkappa>1$; для гидравлически неправильных пор $\chi=4$, $\varkappa>>>1$.

Для оценки возможности получения эффективных звукопоглощающих материалов необходимо рассматривать не только вид пористой структуры, но и размеры пор, поскольку этот параметр тесно связан с частотой поглощаемого звука. Так, увеличение звукопоглощения на низких частотах может быть достигнуто за счет наличия в материале крупных пор, а на высоких — за счет мелких пор. Следовательно, для поглощения звука в широком диапазоне частот необходимо сочетание крупных и мелких пор. Однако при этом следует учитывать то обстоятельство, что существуют границы нижнего и верхнего пределов крупности пор для каждого вида пористой структуры. С уменьшением размера пор при сохранении абсолютных значений пористости увеличивается их количество и, следовательно, поверхность пор. Однако очевидным является и то, что при превышении какого-то предела существенно повысится входное сопротивление материала звуковым волнам и поры перейдут в категорию акустически пассивных.

Исследованиями установлено, что минимально допустимые размеры пор, активно участвующих в гашении звука, должны составлять 100 мкм. Для волокнистых пористых структур наибольший эффект при гашении низкочастотного звука достигается в случае наличия пор размером 350...400 мкм и 20...50 мкм — при гашении высокочастотного звука.

Ограничение верхнего предела крупности пор (примерно 400...500 мкм) связано с тем, что дальнейшее увеличение размеров пор вызывает существенное увеличение инерционной составляющей воздуха по сравнению с его вязкостью. Поэтому независимо от вида пористой структуры материала коэффициент звукопоглощения при увеличении размеров пор уменьшается.

Следовательно, для достижения наибольшего эффекта звукопоглощения необходимо учитывать превалирующую частоту звука в данном помещении и, сообразуясь с ней, применять звукопоглощающий материал с оптимальной для данной частоты пористой структурой, характеризующейся ее видом, размером пор и их распределением по крупности.

Таким образом, на основании рассмотрения влияния пористой структуры на функциональные свойства звукопоглощающих мате-

риалов можно сформулировать положения, определяющие оптимальную структуру этих материалов.

Во-первых, материал должен характеризоваться многомодальной пористостью, т. е. наличием различных по размерам пор в пределах нижнего и верхнего пределов крупности, обеспечивающих гашение звуковых волн в широких диапазонах частот.

Во-вторых, количество сообщающихся пор должно быть достаточным (70...90%) для обеспечения прохождения звуковой волны в толщу материала и достижения фильтрационного режима его работы, характеризующегося наличием наибольшего трения воздуха о стенки пор материала и, следовательно, наибольшим эффектом перевода звуковой энергии в тепловую.

В-третьих, вид и размеры пор, соотношение объемов открытой и закрытой пористости должны обеспечивать необходимое сопротивление продуванию, численно равное (1...2) $\rho_0 C_0$ при гашении звука низких и средних частот и примерно $10\rho_0 C_0$ при гашении высокочастотного звука.

Оптимизация пористой структуры для улучшения строительно-эксплуатационных свойств базируется на тех же основных параметрах, что и для теплоизоляционных материалов. В связи с этим в данном разделе этот вопрос подробно не рассматривается.

Однако следует отметить весьма важную особенность звукопоглощающих материалов — преобладание открытой сообщающейся пористости. Это обстоятельство делает их весьма чувствительными к изменениям условий эксплуатации: относительной влажности воздуха, температуры, механических нагрузок, которые вызывают набухание, коробление, прогибы изделий и другие нежелательные изменения.

Отношение материалов к действию влаги в значительной степени определяет их эксплуатационные возможности Знакопеременные процессы, связанные с колебаниями влажности, вызывают обратимые и необратимые изменения структуры материалов и практически всегда сопровождаются потерей прочности. Наличие в звукопоглощающих материалах довольно большого количества капилляров и мелких пор определяет их высокую сорбционную способность. Адсорбция водяных паров, находящихся в воздухе, — процесс обратимый, который имеет место при малых давлениях пара и характеризуется образованием мономолекулярного слоя воды на поверхности пор. При увеличении концентрации пара в воздухе на поверхности пор могут образовываться многомолекулярные слои, которые в микропорах смыкаются с образованием вогнутых или выпуклых менисков.

Установлено, что размер пор, в которых происходит капиллярная конденсация влаги при нормальных температурно-влажностных условиях, составляет 0,2 мкм. В порах большего диаметра этот процесс затруднен. Следовательно, при формировании пористой структуры звукопоглощающих материалов необходимо стре-

[illegible] 0,2 мкм.

Весьма действенным приемом, снижающим сорбционную способность материалов, является введение гидрофобных добавок. Другим способом повышения водостойкости материалов является перевод водорастворимых компонентов в нерастворимое состояние путем введения соответствующих добавок — модификаторов.

Важным показателем эксплуатационной стойкости звукопоглощающих материалов является биологическая стойкость. Установлено, что из общего числа повреждений 15...20% приходится на микробиологическую коррозию, которая имеет место в материалах, содержащих как органические, так и минеральные вещества. Увлажнение материалов способствует развитию биологической коррозии.

В общем виде биологическая коррозия — сложный многоплановый процесс, зависящий от состава материала и параметров окружающей среды.

Весьма действенным способом повышения биостойкости строительных материалов вообще и звукопоглощающих, в частности, является введение в состав материалов антисептиков с учетом вещественного состава этих материалов. Повышение биостойкости обеспечивается также исключением условий, способствующих появлению и размножению микроорганизмов путем создания необходимых температурно-влажностных режимов в помещениях, снижения сорбционной способности материалов и т. п.

Таким образом, качество звукопоглощающих материалов главным образом зависит от их пористой структуры, определяющей как их функциональные, так и строительно-эксплуатационные свойства.

Для получения звукопоглощающих материалов применяют те же способы поризации, что и при производстве теплоизоляционных материалов. Однако технологические приемы и параметры изменяют с целью создания наибольшего количества сообщающихся пор и оптимизации их размеров.

Звукопоглощение материалов, получаемых на основе минеральных волокон, во многом зависит от расположения волокон в объеме материала. Оно может быть горизонтальным, вертикальным, хаотичным (произвольным) и в виде гранул.

С технологических позиций наиболее простым способом укладки волокон является их горизонтальное расположение. Такая укладка обеспечивается при подпрессовке ковра в камере волокноосаждения, при отливе ковра на длинносетчатых машинах. Укладка волокон в виде гранул требует их предварительной грануляции. Наиболее ярко выраженная произвольная укладка волокон имеет место при получении изделий методом напыления. Существуют способы, позволяющие получать изделия с вертикальной направленностью волокон.

Таким образом, в зависимости от способа укладки и уплотнения волокон можно получать пористость, различную по форме, ве-

личине и направленности. Горизонтальное расположение волокон обеспечивает получение в основном одномодальной (примерно равноразмерной) пористости, объем которой определяется степенью уплотнения ковра, отсутствием или наличием связующего вещества и его количеством.

Размер же пор при постоянной массе материала зависит главным образом от толщины применяемых волокон. В этом случае структура характеризуется сообщающимися порами, вытянутыми в горизонтальном направлении. Такое расположение пор является не всегда благоприятным для эффективного звукопоглощения, так как ухудшаются условия для вхождения звуковых волн в материал при их направленности по нормали к его поверхности.

Пористость, расположенная вертикально, т. е. по нормали по отношению к поверхности материала, создает благоприятные условия для прохождения звуковых волн в толщу материала. Однако в этом случае сопротивление продуванию существенно уменьшается и для достижения эффективного звукопоглощения требуется существенное увеличение толщины звукопоглощающего материала.

Произвольное расположение волокон позволяет получать более разнообразное сочетание пор по величине и расположению. Такая структура обеспечивает наиболее благоприятные условия для прохождения звуковых волн в толщу материала и их гашение в ограниченном объеме. Поры в этом случае характеризуются различными размерами, что позитивно сказывается на звукопоглощении волн в весьма широком диапазоне частот.

Пористость материалов из гранулированных минеральных волокон носит ярко выраженный двухмодальный характер: крупные сообщающиеся поры располагаются между гранулами и мелкие — внутри гранул. С точки зрения процесса затухания звуковой волны такая пористость близка к идеальной. Она обеспечивает свободное проникновение звуковых волн в толщу материала и интенсивное гашение звука за счет колебаний воздуха, находящегося в порах гранул. При этом диапазон звуковых волн, подвергающихся гашению, заведомо шире, чем во всех приведенных выше случаях. При получении такого вида пористости возникают легко осуществимые возможности направленного регулироваиия пористой структуры: изменение гранулометрии и плотности гранул, диаметра и длины волокон, степени подпрессовки при формовании изделий, количества и вида связующего.

Содержание связующего в волокнистых материалах определяется необходимостью достижения определенной прочности, обеспечивающей транспортирование и монтаж изделий. Во всех случаях увеличение содержания связующего в составе материала приводит к уменьшению пористости. Поэтому целесообразно достигать повышения прочности за счет применения связующего с высокими адгезионно-когезионными свойствами.

Таким образом, оптимальная пористая структура волокнистого звукопоглощающего материала характеризуется двухмодальной пористостью, образованной гранулами из тонких минеральных волокон, контактно омоноличенных связующим, обладающим высокими адгезионно-когезионными свойствами.

Для получения звукопоглощающих изделий с ячеистой пористой структурой применяют способы пено- и газообразования. Регулирование показателей пористости осуществляют в этом случае, используя те же основные принципы, что и при получении теплоизоляционных материалов. Однако характер пористой структуры у теплоизоляционных и звукопоглощающих материалов с позиций обеспечения высоких функциональных свойств должен иметь принципиальные различия. Эти различия прежде всего касаются степени замкнутости пор. Если при получении теплоизоляционных материалов стремятся сформировать в основном замкнутую пористость с целью снижения конвективного переноса теплоты, то формирование пористой структуры звукопоглощающих материалов осуществляют, стремясь создать превалирующее количество сообщающихся пор. В этом случае создаются наиболее благоприятные условия для гашения звука по мере прохождения звуковых волн через толщу материала. Однако необходимо помнить, что по мере увеличения сообщающихся пор прочность материалов снижается.

Звукопоглощающие материалы с ячеистой структурой получают, применяя способ пенообразования (вспениванием) или газообразования (вспучиванием). При этом стремятся создавать полидисперсную пористость и тонкие межпоровые перегородки. Достигается это регулированием реологических свойств поризуемых смесей и тонким измельчением твердой фазы, формирующей межпоровые перегородродки.

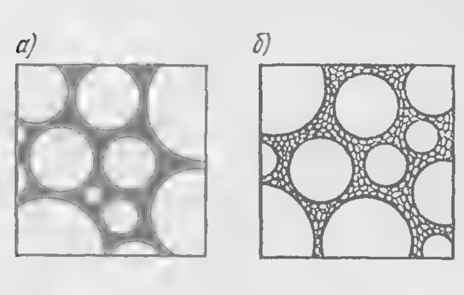
Применение способа газового вспучивания наиболее целесообразно для получения высокого объема (до 50...60%) сообщающихся пор. В этом случае изменение количества газообразователя и условий вспучивания наряду с изменением реологических характеристик поризуемых смесей позволяет относительно легко изменять в нужном направлении характер пористой структуры.

Таким образом, оптимальной ячеистой структурой звукопоглощающих материалов и изделий следует считать пористую структуру, характеризующуюся высоким объемом газовой фазы (не менее 85%), полидисперсной пористостью с объемом сообщающихся пор не менее 60%, а также тонкими и прочными межпоровыми перегородками, обеспечивающими необходимую монтажную и эксплуатационную прочность материала.

Пористая структура зернистых звукопоглощающих материалов характеризуется весьма высокими акустическими качествами. Этому способствуют следующие основные факторы: гидравлически правильная форма пор, обеспечивающая более свободное вхождение звуковых волн в толщу материала и наличие большего объема сообщающихся пор, образованных межзерновыми пустотами. Наиболее высокими звукопоглощающими свойствами обладают засыпки, позволяющие весьма легко регулировать характеристики пористой

структуры: общий объем и размеры пор, что оказывает решающее влияние на эффективность звукопоглощения. Изменяя гранулометрию и размеры зерен, применяя материалы с высокой пористостью зерен, можно активно влиять на звукопоглощение засыпок в различных диапазонах частот.

Однако под воздействием условий окружающей среды (изменяющихся температуры и влажности и др.) засыпки изменяют свои первоначальные свойства. Зерна частично разрушаются, засыпочный слой уплотняется, оседает, образуются воздушные пазухи и т. п. Поэтому предпочтение отдается формованным звукопоглощающим изделиям. При изготовлении изделий с зернистой структурой требуется сохранить сообщающуюся пористость, не снизить существенно общий объем пор, обеспечить их полидисперность, т. е. сохранить все преимущества зернистой структуры. Достигают этого, применяя контактное омоноличивание зерен, поризованное связующее (рис. 5.6) или то и другое вместе. В этих случаях функциональные и общестроительные свойства звукопоглощающих изделий будут зависеть от гранулометрии и размера зерен, их пористости, количества введенного в материал связующего и его адгезионно-когезионных характеристик, величины пористости и характера пор в связующем.



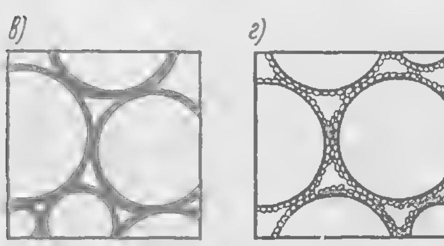


Рис. 5.6. Разновидности зернистой структуры:

а — зернистая структура, омоноличенная объемно-непоризованным связующим; *б* — омоноличенная объемно-поризованным связующим; *в* — омоноличенная контактно-непоризованным связующим; *г* — омоноличенная контактно-поризованным связующим

С точки зрения достижения наиболее высоких функциональных свойств оптимальной структурой звукопоглощающих изделий с зернистой пористостью следует считать структуру, сложенную высокопористыми полидисперсными зернами, омоноличенными контактно поризованным вяжущим, характеризующуюся сопротивлением продуванию r значением, близким к $(2...4)\rho_0 C_0$, и структурным фактором $\chi=\rho/\rho_0$, близким к 1.

При этом надо иметь в виду, что понижение размера зерен увеличивает удельную поверхность межзерновых пор, что весьма полезно для гашения звука за счет трения колеблющегося воздуха. Однако это же обстоятельство приводит к увеличению содержания связующего из-за роста поверхности зерен, что существенно снижает общую пористость материала, т. е. негативно влияет на звукопоглощение свойства материала.

Для достижения необходимых прочностных показателей изделий без заметного снижения их акустических свойств необходимо применять связующие с высокими адгезионно-когезионными характеристиками и минимизировать за счет этого их содержание в материале. Изменяя реологические характеристики связующего, можно регулировать толщину его пленок, покрывающих зернистые компоненты материала и тем самым управлять процессом структурообразования.

ГЛАВА 6

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВОЛОКНИСТЫХ, ЗЕРНИСТЫХ И ПОРОШКООБРАЗНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Несмотря на то что применение теплоизоляции началось давно, производство теплоизоляционных материалов и изделий представляет собой одну из молодых подотраслей промышленности строительных материалов. Развитие заводского производства теплоизоляционных материалов в нашей стране относится к эпохе социалистической индустриализации. Уже в годы первой пятилетки (1928—1932) возникло довольно большое число производств новых для того времени теплоизоляционных материалов: стеклянного волокна, шлаковой ваты, совелита, неавтоклавного пенобетона, магнезиального фибролита, торфоплит и др. Переход на заводское изготовление теплоизоляционных материалов и изделий диктовался резким повышением объемов капитального строительства и обеспечением его эффективными материалами, позволяющими снизить материалоемкость, трудоемкость, повысить индустриальность строительных работ, обеспечить энергосбережение.

С другой стороны, изготовленные в заводских условиях теплоизоляционные материалы и изделия характеризуются гораздо большей стабильностью функциональных и общестроительных свойств в течение эксплуатационного периода, чем традиционно применявшиеся до этого рыхлые и сыпучие материалы — пористые вулканические породы, сухие водоросли, стебли злаковых культур, шерсть, древесные опилки, рыхлые земли, пеплы и т. п. Слеживаемость рыхлых и сыпучих материалов, приводящая к резкому ухудшению теплофизических свойств тепловой изоляции, повышенная увлажняемость, сложность эксплуатации таких теплоизоляционных материалов, необходимость резкого повышения индустриализации строительных работ предопределяли переход к выпуску формованных теплоизоляционных изделий.

Особенно бурное развитие заводского производства теплоизоляционных материалов и изделий началось в послевоенное время, в период восстановления разрушенного войной хозяйства.

В настоящее время выделились четыре основных направления производства теплоизоляционных материалов: создание искусственных пористых зернистых материалов с последующим формованием из них высокопористых изделий; формование изделий из природных пористых материалов путем дополнительной поризации в процессе изготовления; производство высокопористых изделий из плотных искусственных и природных волокнистых и порошкообразных материалов одним из известных способов; производство рыхлых и сыпучих материалов для засыпной теплоизоляции.

Эти же основные направления используют для получения акустических изделий и материалов, производство которых получило большое развитие за последнее двадцатилетие.

Производство высокопористых изделий по первым трем направлениям основывается на омоноличивании исходных материалов (структурообразующих элементов) путем формования и отверждения. От способов формования и условий производства изделий из волокнистых, зернистых и порошкообразных материалов решающим образом зависят структура и, следовательно теплотехнические, акустические и общестроительные свойства высокопористых изделий и материалов.

Теплоизоляционные и акустические высокопористые изделия изготовляют путем формования исходных композиций (масс) с целью создания в материале пористости заданного объема и вида. Решающее значение при этом имеют реологические свойства формовочных масс, предопределяющие способ и параметры формования, а также вид пористой структуры и свойства изделий.

От реологических свойств связующего (в случае производства изделий из зернистых элементов с помощью контактного или объемного омоноличивания) или массы (при получении изделий с ячеистой структурой из вязкотекучих композиций (вспучиванием) зависят расход вяжущего (связующего), длительность технологических циклов перемешивания, формования и отверждения изделий, их свойства (средняя плотность, прочность, теплопроводность, коэффициент звукопоглощения и т. д.), а также экономические показатели производства самих изделий.

Повышение подвижности связующих и исходных масс позволяет уменьшить толщину омоноличивающих прослоек и межпоровых перегородок и тем самым сократить расход связующего, понизить среднюю плотность и повысить функциональные свойства изделий, повысить однородность формовочных смесей и ускорить процесс смешивания.

Вместе с тем повышение подвижности традиционным способом (увеличением водосодержания смеси или содержания растворителей при получении материалов на основе полимерных связующих) существенно удорожает производство и ухудшает свойства материалов.

Разбавление связующего снижает седиментационную устойчивость системы, что способствует расслоению исходных смесей; замедляет набор прочности материалом, повышает энергетические затраты на процесс твердения; снижает плотность связующего и, как следствие, приводит к существенному недобору прочности материала; увеличивает усадочные деформации, могущие привести к трещинообразованию и короблению изделий, повышает водопоглощение и сорбционную влажность материала и соответственно эксплуатационную теплопроводность.

Поэтому регулирование реологических свойств стремятся осуществлять комплексом различных приемов. Например, внешними воздействиями на структурированные смеси (вибрацией), вызывающими тиксотропный эффект, введением поверхностно-активных веществ, изменением температуры, т. е. способами, позволяющими направленно регулировать реологические свойства формовочных масс и связующих без их сильного разбавления.

6.1. Классификация способов получения высокопористых материалов и изделий

Для решения главной технологической задачи — получения теплоизоляционных и акустических материалов и изделий с заданной высокопористой структурой — применяют несколько десятков способов в зависимости от вида исходного сырья и заданных свойств изделий. Все многообразие способов поризации можно подразделить на шесть основных групп.

Вспучивание. Этот способ поризации основан на выделении в пластично-вязкой массе или введении в нее газовой фазы в виде водорода, кислорода, диоксида углерода, паров воды, воздуха, изопентана, фреона и др. В результате насыщения массы газовой фазой увеличивается ее объем — происходит вспучивание (вспенивание). Образуется дисперсная система — воздух в «жидкости», твердеющая при дальнейшей технологической обработке (автоклавировании, пропаривании, охлаждении, нагревании и т. д.).

При вспучивании формируется ячеистая пористая структура, общий объем пористости которой зависит от количества введенного и удержанного массой газообразного компонента. Решающее влияние на показатели пористой структуры оказывают реологические характеристики поризуемых масс.

Вспучивание охватывает следующие способы поризации: низкотемпературное газообразование, высокотемпературное газообразование, пенообразование (воздухововлечение). Общим для всех разновидностей вспучивания является пластично-вязкое состояние поризуемых масс в период их поризации, т. е. поризуемые массы должны обладать способностью необратимо деформироваться (течь) без разрыва сплошности. Как известно, пластично-вязкое состояние тел характеризуется реологическими показателями: вязкостью, предельным напряжением сдвига, текучестью, пластической прочностью, поверхностным натяжением. Для успешного проведения вспучивания и получения материала с заданной пористой струк-

турой необходимо направленно регулировать реологические характеристики поризуемых масс.

Существует единственный материал, вспучивание которого происходит без его перехода в пластично-вязкое (пиропластическое) состояние — вермикулит. При этом образуется пластинчатая пористость за счет раздвижки пластинок слюды межпакетной водой, переходящей в парообразное состояние при нагревании частиц вермикулита до высоких температур.

Удаление порообразователя. В основу этого способа положено испарение или выжигание порообразователя, которое происходит при средне- или высокотемпературном воздействии. При этом объем поризуемой массы практически не изменяется, вспучивания не происходит. В качестве порообразователей применяют воду, легколетучие жидкости, выгорающие твердые добавки. При использовании выгорающих добавок образуется, как правило, ячеистая пористая структура, при применении испаряющихся жидкостей — пористо-капиллярная.

Неплотная упаковка. Этот способ используют при изготовлении волокнистых и зернистых высокопористых материалов. Применительно к волокнистым материалам и изделиям он основан на свойлачиваемости, т. е. на перепутывании волокон и удержании приданной изделию формы за счет трения и зацепления волокон между собой. В этом случае получают волокнистую пористую структуру, характеристики которой зависят от толщины и длины применяемых волокон, а сохранение первоначальных свойств — от упругости волокон, их стойкости в среде эксплуатации.

В случае применения пористых зернистых компонентов этот способ предполагает получение теплоизоляционных засыпок, пористость которых и ее характеристики зависят от пористости используемых зерен, величины этих зерен и их гранулометрического состава. Увеличение общей пористости предопределяется прежде всего применением монофракционного состава зерен, а уменьшение размера пор — снижением их среднего диаметра.

Таким образом, неплотная упаковка волокнистых и зернистых материалов реализуется при свойлачивании и механическом диспергировании и рассеве

Контактное омоноличивание. Способ, широко используемый при производстве теплоизоляционных и акустических изделий, основан на омоноличивании зернистых и волокнистых элементов структуры в местах их взаимного контакта с помощью тонких склеивающих прослоек. Эти прослойки создают, вводя в каркасообразующий материал маловязкие композиции связующего, равномерно и тонким слоем распределяя его по поверхности зерен или волокон, которые затем приводят к соприкосновению путем применения к ним небольших прессующих усилий. В качестве связующих используют жидкотекучие композиции (предпочтительно водные растворы) полимеров, цемента, глины, растворимого стекла. Вид пористости материалов, получаемых контактным омоноличиванием, зависит от вида

применяемых каркасообразующих материалов: из волокон формируется волокнистая пористая структура, из зерен — зернистая. Контактное омоноличивание осуществляют, применяя различные технологические способы распределения связующего по поверхности структурообразующих элементов, формования изделий и удаления излишков связующего из материала. На свойства изделий, получаемых этим способом, существенное влияние оказывают реологические характеристики связующих, их клеящая способность и методы введения в формовочную смесь.

Объемное омоноличивание. Этот способ отличается от предыдущего тем, что связующим заполняют все пустоты между каркасообразующим материалом. В подавляющем большинстве объемное омоноличивание применяют для получения материалов из высокопористых зерен. При этом с целью увеличения общей пористости материала стремятся применять полифракционные высокопористые зерна, с тем чтобы достичь их наибольшего количества в объеме материала. Вторым эффективным приемом повышения пористости является применение поризованного связующего (в виде пеномассы). Материал в этом случае получают с ячеистой пористостью, складывающейся из пористости зерен и пористости связующего.

Создание комбинированных структур. Этим способом получают высокопористые изделия с двумя видами пористости и более: волокнисто-ячеистой, зернисто-ячеистой, волокнисто-ячеисто-капиллярной и т. п. Целью создания комбинированных структур является увеличение общей пористости изделий, повышение их прочностных показателей при изгибе. Этот способ включает множество технологических разновидностей, отличающихся последовательностью получения пористых структур, а также сочетаниями технологических операций.

6.2. Физико-химические основы создания высокопористых структур теплоизоляционных и акустических материалов и изделий

Вспучивание. Этот способ получил весьма широкое применение при изготовлении высокопористых материалов. Его используют в производстве ячеистых бетонов, керамических и огнеупорных теплоизоляционных изделий, изделий из ячеистого стекла, пенопластов, вспученных перлита, вермикулита, гранул из растворимого стекла. Наиболее широкое применение получил способ газообразования.

Газообразование. Сущность этого способа состоит в выделении газообразных продуктов во всем объеме поризуемого материала, находящегося в пластично-вязком (в том числе и пиропластическом) состоянии. Газообразование имеет ряд разновидностей, различающихся по следующим признакам: химизму процесса газообразования; виду газообразователя; температуре газообразования и вспучивания массы.

По химизму процесса газообразование подразделяют на два способа: первый основан на выделении газа при взаимодействии газообразователя с компонентами вспучиваемой массы (газообразователи — алюминиевая пудра, карбонаты, кислоты и др.); второй — на выделении газа из газообразователя без его взаимодействия с поризуемой массой (газообразователи — пероксид водорода, порофоры, углеродсодержащие вещества).

По виду различают газообразователи, вводимые в поризуемую массу (алюминиевая пудра, карбонаты, порофоры и т. д.); газообразователи, являющиеся составной частью вспучиваемого материала (гидратная вода).

По температуре газообразования и вспучивания способ газообразования подразделяют на низкотемпературный (температура процессов до 100°С), среднетемпературный (120...400°С) и высокотемпературный (выше 800°С).

К газообразователям предъявляют определенные требования: обеспечивать плавное течение процесса газовыделения с получением нетоксичных и не вызывающих коррозию продуктов; выделять большой объем газа, т. е. характеризоваться большим газовым числом (см. ниже); обеспечивать наиболее интенсивное газовыделение в температурном интервале, соответствующем размягчению поризуемого материала, т. е. нахождению его в пиропластическом состоянии; быть доступным, иметь невысокую стоимость, обладать устойчивостью свойств при хранении и транспортировании.

Газовое число — это объем газа, мл, приведенный к нормальным условиям, выделяемый в единицу времени 1 г газообразователя при температуре максимального газовыделения. Этот показатель служит для первичной оценки эффективности газообразователей.

Способ газообразования наиболее широко применяют для производства высокопористых материалов из масс, представляющих собой высококонцентрированные суспензии. Типичными представителями таких материалов являются ячеистые бетоны, получаемые на основе портландцемента, извести, смешанного цементно-известкового вяжущего и кремнеземистого компонента. В данном случае в качестве газообразователя наиболее широко применяют алюминиевую пудру. Она представляет собой тонкодиспергированный порошок алюминия, частицы которого имеют форму лепестков со средним диаметром 20...50 и толщиной 1...3 мкм. Каждая частица алюминия покрыта тонкой пленкой стеарина, придающего пудре гидрофобность. В результате пудра, предназначенная главным образом для производства краски, приобретает высокую-кроющую способность и всплываемость. Однако в технологии теплоизоляционных и акустических материалов это обстоятельство существенно усложняет равномерное распределение ее как газообразователя в массе.

Для предотвращения всплывания частиц пудры необходимо применять массы, вязкость которых не позволяет этим частицам свободно перемещаться в их объеме. Существуют также способы удаления стеариновой пленки непосредственно перед введением пудры в поризуемую массу.

Уже в процессе помола каждая частица алюминия окисляется и покрывается тонкой пленкой оксида, характеризующейся высокой плотностью. Сильные щелочи и кислоты при средней концентрации растворяют пленку:

$$Al_2O_3 + 2\overline{OH} \rightarrow 2AlO_2^- + H_2O$$

С обнаженной поверхности алюминий переходит в раствор в виде ионов Al^{3+}, при этом выделяются три моля водорода:

$$2Al + 6H^+ \rightarrow 2Al^{3+} + 3H_2 \nearrow$$

Таким образом, 1 г Al выделяет 1250 см³ водорода, а при температуре оптимального газовыделения (~50°С) этот объем составляет 1500 см³. Для сравнения приведем газообразующую способность перекиси водорода, 1 кг которой, разлагаясь на воздухе:

$$2H_2O_2 \rightarrow 2H_2O + O_2 \nearrow$$

выделяет 133 л O_2 или 1 г — 133 см³, т. е. на один порядок меньше, чем алюминий

Рассмотрим механизм вспучивания структурированных суспензий газообразованием. Формирование высокопористой структуры в этом случае предполагает равномерное распределение газообразователя во всем объеме вспучиваемого материала и удержание выделившегося объема газа в массе.

Процесс формирования ячеистой высокопористой структуры газообразованием включает три стадии: зарождение газового пузырька, рост его объема, стабилизацию размеров и местоположения газового пузырька. Во всех трех стадиях процесс газовыделения должен строго сочетаться с изменением реологических характеристик поризуемой системы. Активное управление этими двумя факторами предопределяет формирование пористой структуры с заданными характеристиками и, следовательно, получение материала с заданными свойствами.

Рассмотрим вначале возможности направленного регулирования реологических свойств поризуемых масс, представляющих собой в данном случае водные концентрированные суспензии.

Реологические свойства таких систем описываются уравнением

$$\tau_0 - \tau = \eta_{пл} dv/dx, \qquad (6.1)$$

где τ_0 — предельное напряжение сдвига (предел текучести); $\eta_{пл}$ — коэффициент внутреннего трения пластично-вязкого тела (пластическая вязкость). При сдвиговых напряжениях, меньших τ_0 (при $\tau < \tau_0$), в системе наблюдаются лишь упругие деформации. Если же $\tau > \tau_0$, то деформации носят необратимый пластический характер, т. е. система в этом случае течет, под действием неизменяющейся

силы деформации нарастают. В зависимости от внешнего воздействия разрушается структура, что сопровождается понижением структурной вязкости.

Основными показателями, характеризующими пластично-вязкие системы, являются предельное напряжение сдвига и пластическая вязкость.

Теория пластичности дисперсных систем, принятая в настоящее время, базируется на модели твердого пластично-вязкого тела, в которой отражены свойства абсолютно твердого тела и истинной жидкости. Механическая модель — аналог пластично-вязкого тела (рис. 6.1) отражает упругие свойства (пружина), предел текучести τ_0, выражаемый силой трения между массой и столом, и вязкое сопротивление движению $\eta_{пл}$ (двигающийся просверленный поршень в вязкой жидкости).

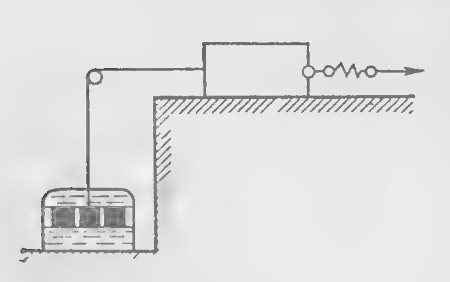


Рис. 6.1. Механическая модель-аналог пластично-вязкого тела

Пластичность дисперсных систем обусловливается наличием на твердых частицах тонких адсорбционных пленок воды, которая обладает свойствами упругого твердого тела. Толщина этого слоя может меняться в зависимости от поверхностных свойств твердой фазы (адсорбционной способности, уравновешенности химических связей, микрорельефа и т. д.), наличия примесей в воде (ионов солей, кислот, щелочей) и ряда других факторов. Предельное напряжение сдвига (предел текучести) τ_0 в значительной мере зависит от наличия свободной воды в виде прослоек между полутвердыми слоями адсорбированной на твердых частицах воды. Чем ее больше, тем меньше значения предела текучести. На механической модели-аналоге этот фактор можно объяснить уменьшением трения между массой и столом в случае наличия водяной прослойки между их поверхностями.

Таким образом, регулирование значений предельного напряжения сдвига можно осуществлять изменением концентрации суспензии. Этот же фактор оказывает влияние и на коэффициент внутреннего трения, т. е. на вязкость. Чем ниже концентрация суспензии, чем больше в ней свободной воды, тем ниже значения вязкости. Это тоже хорошо иллюстрируется механической моделью-аналогом; чем больше воды введено в вязкую жидкость, тем меньше значения вязкости образовавшейся эмульсии.

Следовательно, для регулирования показателей предельного напряжения сдвига и вязкости структурированных суспензий (твердых и пластично-вязких тел) можно применять простой прием: изменять водосодержание системы. Этим приемом часто пользуются на практике. Он эффективен на первой стадии газообразования — при зарождении газового пузырька. В этом случае резкое снижение предельного напряжения сдвига весьма полезно, так как даже при небольшом давлении газа система необратимо деформируется (течет) без разрыва сплошности. Однако избыток воды в системе весьма ощутимо снижает и ее вязкость. А этот фактор оказывает негативное влияние на последующие стадии порообразования. Уменьшение вязкости приводит к снижению газоудерживающей способности поризуемой массы, ухудшению пористой структуры, замедлению стабилизации пористости и т. п. Наиболее благоприятным сочетанием реологических свойств для образования ячеистой структуры способом газообразования является невысокий показатель предельного напряжения сдвига при достаточно высокой вязкости поризуемой массы. Следовательно, избыток воды в поризуемой массе не обеспечивает оптимального соотношения между двумя физическими постоянными, характеризующими данную систему.

Резкое снижение предельного напряжения сдвига при незначительном изменении вязкости может быть достигнуто разрушением структуры тонкодисперсной суспензии, содержащей небольшое количество воды, внешними динамическими воздействиями. Хорошо известным и наиболее распространенным приемом разрушения внутриструктурных связей является вибрирование дисперсных систем. При вибрировании проявляются тиксотропные свойства смесей, т. е. структурная сетка, сформированная из твердой и жидкой фаз, разрушается и каждая твердая частица концентрированной суспензии приобретает свойство двигаться самостоятельно. Ориентирование частиц нарушается, удерживаемое ранее сеткой частичек некоторое избыточное количество воды (иммобилизованная вода) высвобождается, структурированная концентрированная суспензия приобретает на время вибрирования свойства тяжелой жидкости. При этом предельное напряжение сдвига такой жидкости незначительно, а значение структурной вязкости велико и зависит, во-первых, от начального водосодержания смеси и, во-вторых, от интенсивности вибрации, определяющей степень разрушения структуры. После прекращения вибрации смесь восстанавливает свои первоначальные реологические свойства. Причем период восстановления структуры является определенной величиной, зависящей от концентрации дисперсной твердой фазы: чем она выше, тем короче период восстановления структуры.

Если действие вибрации иллюстрировать механической моделью-аналогом (см. рис. 6.1), то можно проследить следующее. При приложении вибрации к столу установленный на нем груз при ускорении, обеспечивающем преодоление его массы, будет отбрасываться вверх. Отделяясь на короткие промежутки времени от поверхности стола, груз получает в эти мгновения возможность свободно двигаться в горизонтальном направлении под действием силы P. Таким образом, резко уменьшается трение между поверхностями стола и груза, моделирующее предельное напряжение сдвига. Вместе с тем вязкое сопротивление жидкости изменяется незначительно, так как воды в высококонцентрированной системе

мало и высвобождается она от связей далеко не вся. Следовательно, вязкость системы претерпевает небольшие изменения.

Таким образом, вибрирование концентрированных суспензий дает возможность направленно и строго во времени изменять их реологические характеристики. При этом, изменяя интенсивность вибрационных воздействий (частоту, амплитуду), направленность вибрации, ее место приложения, можно активно влиять в нужном направлении на степень разрушения структуры и, следовательно, на реологические характеристики формовочных смесей.

Применение поверхностно-активных веществ позволяет дополнительно влиять на реологические свойства поризуемых масс.

Влияет на реологические свойства композиций и температура. Эта зависимость имеет сложный и многофакторный характер. С одной стороны, повышение температуры приводит к понижению поверхностного натяжения и вязкости воды, что должно снижать предельное напряжение сдвига и вязкость композиций; с другой стороны, при этом существенно сокращается период гидратации минеральных вяжущих веществ и коллоидации различных тонкодисперсных систем, что приводит к возрастанию реологических показателей. При этом значимость второго фактора больше, чем первого, и это надо учитывать, стараясь провести активное газовыделение до начала схватывания вяжущего, вызывающего резкое повышение реологических характеристик смеси.

Таким образом, существует комплекс технологических факторов, позволяющих направленно изменять реологические свойства минеральных композиций и тем самым создавать наиболее благоприятные условия для порообразования их газовым вспучиванием на всех стадиях этого процесса.

Механизм газообразования внутри поризуемой массы достаточно сложен. Газовый пузырек зарождается на поверхности частицы алюминиевой пудры или любого другого газообразователя, причем газ, как правило, начинает выделяться не со всей поверхности газообразователя, а лишь на участках поверхности с повышенной активностью. Для алюминиевой пудры — это трещины в оксидной пленке, возникающие вследствие больших объемных изменений при послойном оксидировании металла. В этот момент предельное напряжение сдвига поризуемой массы должно быть незначительным. Тонкодисперсные газообразователи имеют малую массу и поэтому объем газового пузырька очень мал. Так, масса частицы алюминиевой пудры равна примерно $4 \cdot 10^{-10}$ г, одна такая частица может образовать пору объемом $6 \cdot 10^{-7}$ см^3. Для образования поры диаметром 1 мм необходимо участие 10^3 частиц алюминиевой пудры. Естественно, что образование таких конгломератов в массе нереально. Поэтому рост и образование газовой поры происходит вследствие двух одновременно протекающих явлений: во-первых, за счет коалесценции (слияния) мельчайших газовых пузырьков при их росте и, во-вторых, за счет втягивания частиц пудры в растущую газовую пору. Оба эти процесса становятся возможными прежде всего потому, что расстояние между частицами алюминиевой пудры весьма мало: $4 \cdot 10^{-3}...1 \cdot 10^{-4}$ см, т. е. в 2 раза и более меньше, чем диаметр газовой поры, образованной одной частицей. Поэтому при росте отдельных газовых пузырьков должно быть их соприкосновение и объединение. Два пузырька и более должны объединяться практически мгновенно с возникновением больших градиентов скоростей. В результате «возмущения» массы к такому пузырьку подходят новые частицы газообразователя. Если эти частицы уже прореагировали и образовали газовый пузырек достаточно большего размера, то происходит процесс коалесценции, аналогичный описанному выше. Если же частица выделила небольшой объем газа, то она может примкнуть к готовому пузырьку.

Рост газовых пузырьков вследствие коалесценции и втягивания частиц газообразования не безграничен. Во-первых, процесс образования газовых пузырьков начинается и протекает во всей массе примерно одновременно, поэтому маловероятно стягивание их к одному центру. Во-вторых, по мере коалесценции пузырьков и стягивания к ним газообразователя расстояние между его отдельными частицами и пузырьками в массе увеличивается, а вероятность их слияния уменьшается. В результате в массе происходит разделение очагов образования макропузырьков. В-третьих, с увеличением размера пузырька угол смачивания уменьшается и сила сцепления его с частицей, пропорциональная синусу этого угла, ослабевает. Происходит отторжение частицы газообразователя от пузырька. Этому же способствует увеличение предельного напряжения сдвига поризуемой массы. Последние два фактора способствуют образованию мелких пузырьков, за счет чего формируется полифракционная пористость. И наконец, последнее обстоятельство, определяющее ограничение роста газовых пузырьков и пористости вообще, — это содержание газообразователя в поризуемой массе, которое строго регламентируется для получения заданного значения пористости.

Прекращение роста пузырька (активного газовыделения) должно совпадать с интенсивным ростом значений реологических показателей массы. Газовый пузырек вследствие огромной разницы в плотностях газа и поризуемой массы стремится всплыть, что может привести к выходу газа из массы (ее «кипению») и уменьшению пористости в случае преодоления газовым пузырьком гидростатического давления столба массы. Чем больше диаметр пузырька, тем большее гидростатическое давление столба массы он может преодолеть. Перемещению газовых пузырьков в горизонтальной (рост пузырьков, коалесценция) и вертикальной (всплытие) плоскостях противодействуют предельное напряжение сдвига и вязкость массы. Поэтому к моменту окончания активного газовыделения и окончанию вспучивания значения этих реологических характеристик должны резко возрастать. Увеличение значения реологических характеристик обеспечивает также стабилизацию размеров газовых пузырьков (пор) за счет прекращения коалесценции и их местоположения.

Зависимость процессов формирования ячеистой пористости при низкотемпературном газообразовании от кинетики газовыделения и изменения реологических свойств массы хорошо иллюстрируется схемой, приведенной на рис. 6.2, которой полностью соответствуют результаты экспериментальных исследований, проведенных с применением прозрачной среды.

В материалах с высокой пористостью полидисперсность распределения пор по размерам достигает больших значений. Связано это с высокой насыщенностью массы частицами газообразователя, создающей благоприятные условия для коалесценции, наличием конгломератов из частиц газообразователя, полидисперсностью газообразователя, неравномерностью распределения его частиц в массе.

Таким образом, полидисперсность газовых пузырьков (пор) является не только необходимым условием получения высокопористого материала, но и технологическим принципом образования больших объемов пористости. Задачи технолога сводятся к нахождению способов формирования заранее заданной пористой структуры материала. Главными из этих задач являются: обеспечение кинетики газовыделения, соответствующей изменению реологических показателей поризуемых масс. Это может быть достигнуто оптимизацией водосодержания масс, температуры процесса вспучивания, применением ПАВ, которые не только активно влияют на реологические свойства масс, но и на процесс газовыделения. Обеспечивая гидрофилизацию алюминиевых частиц, ПАВ интенсифицируют газовыделение, способствуют более раннему их отторжению от газовых пузырьков, что позволяет получить более мелкую пористость. Следует также отметить, что в случае применения алюминиевой пудры кинетика газовыделения зависит от водородного показателя среды (повышение pH среды интенсифицирует газовыделение), температуры массы (с ее повышением возрастает скорость газовыделения). Активизаторами процесса газовыделения являются хлориды, например, NaCl. Необходимо учитывать также, что в ходе реакции поверхность частиц алюминия блокируется продуктами взаимодействия (труднорастворимыми алюмокальциевыми новообразованиями переменного состава) и пузырьками водорода. Это приводит к уменьшению активной поверхности и, как следствие, к снижению активности процесса газовыделения и полноты его прохождения.

Весьма эффективным технологическим приемом является применение вибрирования массы как в период ее приготовления, так и в период вспучивания. При этом за счет тиксотропии повышается равномерность распределения всех компонентов смеси, а в момент вспучивания не только создается благоприятное соотношение между показателями реологических характеристик масс и легко достигается стабилизация полученной пористой структуры путем прекращения вибрационного воздействия, но и резко возрастает скорость газовыделения (в 6...8 раз). Последнее объясняется тем, что при вибрации твердые частицы находятся в движении и за счет соударений и трения очищают поверхность алюминиевых частиц от продуктов реакции и пузырьков газа, обнажая новые реакционноспособные ее участки. Особенно эффективно вибрационное воздействие в сочетании с ПАВ.

Наконец, необходимо отметить, что не весь выделяющийся газ удерживается массой. Поэтому для оценки процесса вспучивания оперируют коэффициентом газовыделения $K_{гв}$ и коэффициентом газоудержания $K_{гу}$. Коэффициент $K_{гв}$ характеризует объем газа, выделяемый газообразователем в технологически рациональный

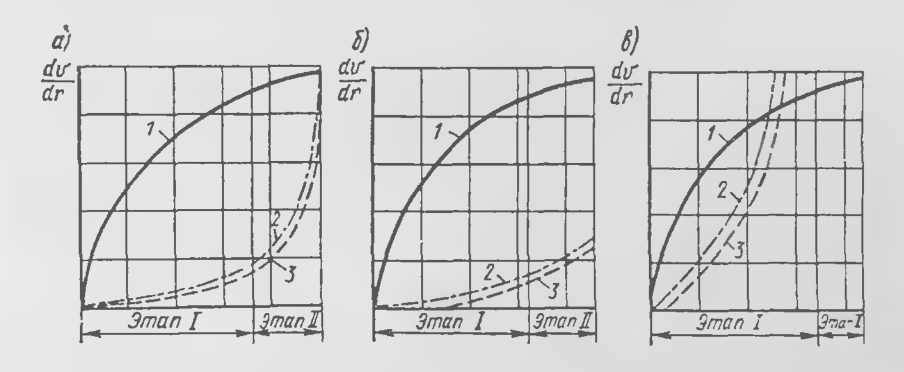


Рис. 6.2. Формирование ячеистой структуры в зависимости от кинетики газовыделения и реологических свойств смесей:

а — формирование оптимальной ячеистой структуры; *б* — возможная осадка массы; *в* — возможное образование слоистой рыхлой структуры; *1* — кинетика газовыделения; *2* — изменение вязкости; *3* — рост предельного напряжения сдвига; этап *I* — интенсивное газовыделение; этап *II* — затухающее газовыделение

отрезок времени. Этот коэффициент всегда на 10...15% ниже теоретического для данного вида газообразователя. Это объясняется наличием в нем нереакционноспособных веществ (например, оксидов алюминия до 5...12%, примесей), неполнотой прохождения реакции газообразования и т. п. Коэффициент $K_{гу}$ отражает отношение объема газа, удержанного массой, к объему газа, образовавшегося в массе. $K_{гу}$ изменяется от 0,7 до 0,85. Чем больше несоответствие между кинетикой газовыделения и изменением реологических свойств, тем меньше значения $K_{гу}$.

Способ газообразования весьма широко применяют при получении газонаполненных пластмасс. Все основные положения этого способа, рассмотренные на примере поризации минеральных концентрированных суспензий, применимы и для получения газонаполненных пластмасс. Здесь следует только добавить, что в зависимости от вида используемых исходных полимерных композиций методы поризации и регулирования реологических свойств поризуемых масс различны и имеют свои особенности.

Применяющиеся для получения газонаполненных пластмасс полимеры подразделяют на: термопластичные полимеры, имеющие

линейное или разветвленное строение молекул (полиолефины, полистирол, поливинилхлорид), которые способны без изменения своей структуры при нагревании и охлаждении многократно размягчаться и затвердевать; термореактивные полимеры, характеризующиеся пространственным строением молекул (фенолформальдегидные, полиуретановые, карбамидные и др), перерабатываемые в изделия в вязкотекучем состоянии и характеризующиеся после полного отверждения нерастворимостью и неспособностью изменять свои реологические свойства под воздействием температуры без изменения структуры вплоть до ее разрушения.

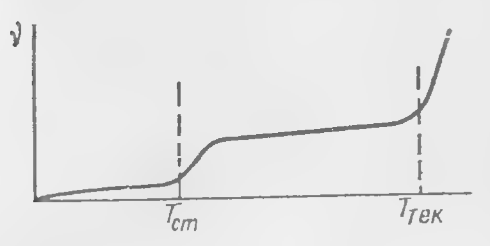


Рис. 6.3. Термомеханическая кривая полимеров

Основным методом регулирования реологических свойств термопластичных полимеров является изменение их температуры. В зависимости от степени нагревания и охлаждения такие полимеры характеризуются различным состоянием, которому соответствуют их реологические свойства. На рис. 6.3 представлена термомеханическая кривая термопластичных полимеров, которым соответствует определенная подвижность их структурных элементов.

В молекулах полимера, находящегося в стеклообразном (твердом) состоянии, колеблются только атомы, входящие в состав цепи. При этом деформации малы и обратимы. При нагревании полимера выше температуры стеклования $T_{ст}$ он переходит в высокоэластичное состояние; деформации существенно увеличиваются, но остаются обратимыми. В этой зоне температур колеблющимися элементами структуры уже являются звенья, образующие молекулу, которые могут изгибаться при приложении нагрузки. Вблизи температуры текучести $T_{тек}$ деформации резко возрастают, а за ее пределами полимер находится в вязкотекучем состоянии. При этом под воздействием внешних сил макромолекулы полимера целиком приходят в движение и перемещаются друг относительно друга; деформация становится необратимой. При понижении температуры полимер проходит все стадии физического состояния в обратном направлении.

Следовательно, для получения высокопористого материала с заданными объемом пористости и характером пористой структуры необходимо изменять температуру и добиваться за счет этого наилучшего соотношения между процессом газообразования и реологическими свойствами поризуемых полимерных композиций.

Регулирование реологических характеристик термореактивных полимеров осуществляют изменением концентрации составляющих их компонентов до окончательного отверждения путем разбавления различными жидкостями.

При получении газонаполненных пластмасс необходимо учитывать ряд обстоятельств, влияющих на свойства готовых изделий.

Так же как и при поризации минеральных систем, реологические характеристики полимерных систем должны изменяться в соответствии с кинетикой процесса газообразования и обеспечивать наряду с высокой вспучиваемостью высокое газоудержание и быстрое закрепление образованной высокопористой структуры.

В этой связи важным параметром технологии высокопористых полимерных материалов является кинетика возрастания вязкости смол в процессе их отверждения за счет прохождения химических процессов и охлаждения. Этот параметр зависит от реакционной способности и концентрации смол, их молекулярно-массовой характеристики, концентрации и активности катализаторов отверждения, температуры процесса и режимов ее изменения.

Для направленного регулирования вязкотекучих свойств и вспенивающей способности композиции в систему для вспенивания вводят различные модифицирующие добавки: пластифицирующие смолы, добавки, выделяющие газ (вспенивающие агенты).

В качестве модифицирующих добавок используют соединения, относящиеся к классу гликолей, фурановых соединений, полиэфиров, галоидопроизводных углеводородов.

В качестве газообразователей применяют твердые, жидкие и газообразные вещества (вспениватели), выделяющие газ вследствие химического взаимодействия с компонентами поризуемой массы, термического разложения или производящие вспенивание композиции за счет интенсивного расширения объема растворенных в полимерной композиции газов при изменении внешних условий (снижении давления и повышении температуры массы).

К наиболее широко применяющимся газообразователям относятся порофоры (органические вещества, разлагающиеся с выделением газов при нагревании); легко кипящие жидкости (изопентан, бензол, фреоны, спирты и т. п.); вещества, не растворяющие вспениваемые полимеры; карбонаты, металлы, реагирующие с серной, фосфорной и соляной кислотами с выделением газов (Al, Zn, Mg, Fe); газообразные вещества (азот, воздух, инертные газы), способные насыщать собой полимерные композиции под давлением.

Получение высокопористых материалов при высоких температурах также основано на обеспечении неразрывности поризуемой массы, т. е. на достижении ею высоких показателей деформативности при нагревании. Это обеспечивается переводом поризуемого вещества из твердого в вязкотекучее (пиропластическое) состояние путем нагревания до определенной температуры, значения которой кроме всего прочего должны соответствовать прохождению процесса газообразования. Этим способом получают такие эффективные высокопористые материалы, как ячеистое стекло, вспученный перлит, стеклопор, керамзит и др.

В данном случае регулирование реологических характеристик поризуемых масс осуществляют изменением температуры нагрева.

Как и во всех предыдущих случаях, при высокотемпературном газообразовании для получения максимальной пористости и заданного характера пористой структуры необходимым условием является соответствие кинетике протекания процесса газообразования изменения реологических свойств поризуемой массы.

При поризации искусственно составленных смесей (например, при получении ячеистого стекла) достижение необходимого соответствия облегчается подбором соответствующего газообразователя, интенсивно выделяющего газ в температурном интервале, в котором поризуемая масса характеризуется наиболее благоприятными для поризации значениями вязкости и предельного напряжения сдвига. Закрепление полученной пористой структуры в этом случае достигается резким понижением температуры, обеспечивающим быстрое нарастание показателей реологических свойств, но не вызывающим разрушающих напряжений. Регулирующими факторами структурообразования являются также химический состав поризуемого материала, определяющий температуру его размягчения, который можно изменять в нужном направлении, количество, дисперсность газообразователя, равномерность его распределения в сырье. Наиболее распространенными газообразователями в данном случае являются твердые вещества, разлагающиеся при нагревании с выделением газовой фазы (карбонаты, углеродосодержащие вещества). Кинетика газообразования регулируется температурой среды, ее составом, дисперсностью газообразователя. Повышение тонкости помола газообразователя, температуры газовой среды и содержания в ней кислорода приводит к интенсификации газовыделения.

Промышленность выпускает значительное количество высокопористых материалов, в которых высокотемпературным газообразователем является гидратная вода. Сырьем для таких материалов служат природные породы (перлиты, обсидианы, пехштайны, вермикулит) или искусственные композиции (силикат натрия), содержащие «растворенную воду». Последняя входит в молекулярную структуру минерала или искусственного вещества, и в силу химической связи с твердым веществом может превращаться в пар лишь при нагревании до высоких температур. Вода интенсивно превращается в пар в искусственных композициях при 200 ... 400°С, в природных минералах при 800 ... 1000°С. При таких температурах обьем образующегося пара больше объема исходной воды соответственно в 600 ... 4000 раз, поэтому при содержании гидратной воды в количестве 0,05 ... 0,5% вспучиваемый материал увеличивается в объеме в 15 ... 40 раз. Кинетика парообразования [illegible] формы связи воды с материалом (фактором нерегулируемым) определяется [illegible] и максимальной температурой нагрева. С повышением температуры не только ускоряется [illegible] увеличивается объем пара, образующегося из единицы массы воды. Поэтому температура является важным фактором увеличения газового числа порообразователя. Регулирование процесса поризации материалов в данном случае достигается направленным изменением следующих основных факторов: крупности частиц материала и режимов тепловой обработки. Понижением крупности зерен поризуемого материала достигается равномерность их прогрева и, как следствие, ускорение перехода в пиропластическое состояние.

Таким образом, для направленного регулирования процесса структурообразования при применении всех видов способа газообразования существует достаточно большое количество технологических факторов, изменяя которые можно получать высокопористые материалы и изделия, с заданными ячеистой структурой и свойствами.

К способу газообразования относится и вспучивание вермикулита (гидрослюда) — единственного материала, поризация которого осуществляется без перехода в пиропластическое состояние. В данном случае высокотемпературное вспучивание происходит за счет перехода гидратной воды, расположенной между слоями слюды, в пар. При этом слюда расслаивается по плоскостям спайности и ее частицы увеличиваются в объеме. Образовавшаяся пористость имеет в основном пластинчатое строение, а вспученные частицы вермикулита имеют вид гармошки.

С п о с о б п е н о о б р а з о в а н и я и а э р и р о в а н и я. Основан на введении воздуха в жидкотекучие растворы или массы, содержащие поверхностно-активные вещества, равномерном его распределении в виде ячеек и стабилизации образовавшейся пеномассы. По принципу создания пеномассы различают следующие способы поризации: пенообразование, предусматривающее раздельное приготовление пены, массы и их смешивание; аэрирование, при котором пена отдельно не приготавливается, а воздух вовлекается непосредственно в массу, содержащую воздухововлекающие ПАВ; сухая минерализация пены, основанная на приготовлении пены и смешивании ее с тонкодисперсными твердыми частицами исходной композиции.

В основе всех этих разновидностей способа пенообразования лежит способность поверхностно-активных веществ собираться на поверхности раздела жидкость — воздух и резко снижать поверхностное натяжение на этой границе раздела. При растворении в воде ПАВ, вследствие полярности молекул, ориентированно адсорбируются на поверхности раздела фаз, повышая вязкость и механическую прочность поверхностных слоев и пленок. С повышением концентрации ПАВ поверхностное натяжение раствора падает до некоторого определенного предела, зависящего как от свойств жидкости, так и от природы ПАВ, оставаясь в дальнейшем практически постоянным.

Максимальная стабильность пены имеет место при насыщении адсорбционных слоев. В насыщенных пенообразователем раство-

рах быстрое наполнение поверхностного слоя молекулами пенообразователя (при растяжении оболочки пузырька) препятствует увеличению поверхностного натяжения, стремящегося разорвать пузырек.

В процессе пенообразования и «жизни» пены можно выделить три периода. В первый период при незначительном содержании в массе воздуха пузырьки пены отделены друг от друга толстыми пленками жидкости и могут свободно перекатываться; это более или менее вязкие, но текучие системы. На этой стадии пена имеет сходство с обычной концентрированной эмульсией.

Во второй период, связанный с насыщением системы воздухом, пузырьки теряют свободу перемещения, превращаясь в полиэдрические ячейки, разделенные тонкими несколько изогнутыми пленками жидкости, т. е. наблюдается преобладание дисперсной фазы над дисперсионной средой. В этот период пена подобна желатинизированной эмульсии, а ее устойчивость определяется механической прочностью остова, образованного из пленок дисперсионной среды.

Третий период — коалесценция соответствует довольно быстрому распаду и превращению пены в две объемные фазы (жидкость — воздух) с минимальной поверхностью раздела.

Рассмотренные пены относят к двухфазным и называют «пустыми» или «чистыми». Их смешивают со строительными растворами, суспензиями полимеров, в результате чего и получают высокопористые материалы.

В устойчивых пенах, полученных из растворов мылоподобных ПАВ, в течение продолжительного времени пленки пены не разрываются, а происходит постепенное диффузионное укрупнение пузырьков. С увеличением воздушных пор утолщаются перегородки и, следовательно, в них увеличивается масса жидкости. В результате снижается устойчивость пены, так как под действием гравитации происходит истечение жидкости из разделяющих пузырьки воздуха пленок — синерезис пены. Развитие этого процесса приводит к разрушению пены. Скорость истечения жидкости из пены зависит от вида ПАВ, начальной кратности пены (отношение объема пены к объему исходного раствора ПАВ) и ее дисперсности, равномерности распределения жидкости по объему пены, температуры и вязкости раствора. Для замедления или ликвидации синерезиса пены вводят различные стабилизаторы.

К пенообразователям, применяющимся для производства высокопористых строительных материалов, предъявляют ряд требований: ПАВ при небольших концентрациях должно резко снижать поверхностное натяжение на поверхности раздела фаз «вода—воздух»; сохранять стойкость пены в водных вытяжках вяжущего и в условиях минерализации; не вызывать заметного удлинения сроков твердения или полимеризации, а также снижения прочности минеральных и полимерных материалов и изделий. Кроме того, пенообразователь должен характеризоваться постоянством состава и свойств при хранении и транспортировании. Он [illegible] быть [illegible] и дешевым, [illegible] запаха и не быть токсичным.

Этим требованиям в наибольшей степени отвечают синтетические поверхностно-активные продукты нефтепереработки и нефтехимического синтеза, заменившие в последнее время пенообразователи, вырабатываемые на основе природных органических продуктов (смолосапониновый, клееканифольный, гидролизованную кровь), которые ограниченно снижают поверхностное натяжение воды (с 73,9 до 50 кН/м), сложны в приготовлении, не обладают стабильностью свойств при хранении и т. п.

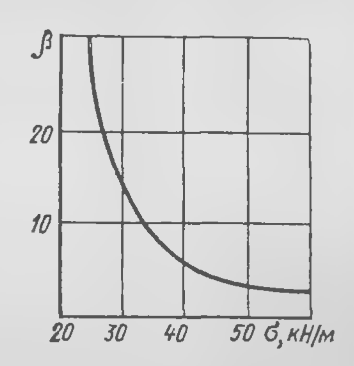


Рис. 6.4. Влияние поверхностного натяжения σ растворов ПАВ на кратность пены β

Синтетические ПАВ представляют собой анион-активные вещества, широко используемые в производстве моющих средств. К ним относят: сульфанолы — смесь натриевых солей алкилбензосульфокислот — крупнотоннажный продукт нефтехимического синтеза в виде порошка или 45%-ного раствора, со стабильными свойствами и с неограниченным сроком хранения, не имеющий запаха; вещество «Прогресс» — смесь солей сернокислых эфиров вторичных спиртов — поверхностно-активный компонент большинства моющих средств; пенообразователь ПО-1 и другие модификации — нейтрализованный керосиновый контакт на основе сульфокислот, выпускаемый для противопожарной техники; вещество «Эффект» — триэтаноламиновая соль лаурилсульфата — промышленный продукт, используемый в качестве пенообразователя во многих областях техники.

Поверхностное натяжение этих ПАВ находится в пределах 27 ...35·10³ Н/м, т. е. весьма мало, что предопределяет их значительную пенообразующую способность (рис. 6.4).

Получаемая способом пенообразования ячеистая структура характеризуется высокой степенью замкнутости пор, плотной и гладкой их внутренней поверхностью, равномерной пористостью по объему материала, примерно одинаковой по сечению толщиной межпоровых перегородок.

Традиционный способ пенообразования в производстве высокопористых материалов — трехстадийный. Он включает следующие этапы: приготовление из водных растворов ПАВ устойчивых технических пен («чистых» пен); приготовление жидкотекучих минеральных или полимерных композиций, образующих твердую фазу (остов) высокопористого материала; смешивание пены и композиции до получения пеномассы заданной пористости. Формуют изделия методом розлива в формы.

Весьма важным фактором, влияющим на стойкость пены при ее смешивании с минеральными или полимерными композициями, является подвижность последних, зависящая от их концентрации, характеризующейся реологическими показателями. Высококонцентрированные композиции (малоподвижные) разрушают пену полностью или частично. В то же время сильно разбавленные композиции твердеют существенно медленнее; возникает опасность осадки пеномассы за счет частичного разрушения структуры. Следовательно, при применении способа пенообразования оптимизация реологических свойств поризуемых композиций имеет важное значение для получения бездефектных структур.

Получают технические пены главным образом диспергационным способом. Пена образуется в результате интенсивного совместного диспергирования пенообразующего раствора и воздуха. Технологически это осуществляется при прохождении струй газа через слой жидкости (в барботажных установках, в пеногенераторах), при действии движущихся устройств на жидкость в атмосфере газа или при действии движущейся жидкости на преграду (при перемешивании в мешалках, встряхивании, взбивании, переливании растворов), при эжектировании воздуха движущейся струей раствора.

Способ аэрирования основан на вовлечении газа (воздуха) непосредственно в поризуемую массу в процессе ее приготовления. С этой целью в воду затворения или полимерную композицию вводят воздухововлекающие добавки (ПАВ). Этот способ отличается простотой технологического процесса (одностадийная поризация); позволяет с высокой точностью регулировать среднюю плотность получаемого материала в широком интервале значений; характеризуется малой дефектностью поровой структуры, отсутствием трещин и «дырок формования» в межпоровых перегородках.

Процесс насыщения концентрированных минеральных и полимерных суспензий воздухом непосредственно связан с изменениями, происходящими на границе раздела жидкой и газообразной фаз при введении в систему ПАВ. ПАВ самопроизвольно накапливаются на границе раздела фаз, обеспечивая снижение поверхностного натяжения, т. е. в данном случае проявляется общность закономерностей, присущих процессам образования «чистых» пен и воздухововлечения. Однако в силу того, что при воздухововлечении поризуемая масса представляет собой более сложную систему, чем при пенообразовании, между этими процессами существуют значительные различия. На процесс воздухововлечения оказывает влияние большое количество технологических факторов; этот процесс более чувствителен к режимам перемешивания и температуре системы, на него оказывают существенное влияние дисперсность и концентрация твердой фазы.

При аэрировании одновременно происходят два процесса: вовлечение воздуха в систему и выход его наружу, который тем больше, чем меньше газоудерживающая способность поризуемой массы. Вовлечение воздуха в смесь из пространства над ее поверхностью осуществляется вследствие образования воздушных каверн лопастями смесителя. Вероятность образования каверны и ее объем зависят прежде всего от скорости вхождения лопасти в систему и размера лопасти. В ходе образования «воздушного следа» гидростатическая сила сообщает смеси ускорение, направленное внутрь каверны. Кинетика последующего разобщения каверн на множество мелких пузырьков определяется интенсивностью перемешивания и реологическими характеристиками массы. Поэтому объем воздухововлечения в сильной мере зависит от типа смесителя, режима перемешивания и реологических свойств смеси.

В вязкой жидкости воздушный пузырек всплывает медленно. В этот период под действием перемешивания воздушные пузырьки перемещаются все дальше в глубь массы, равномерно насыщая ее диспергированным воздухом. Предельное напряжение сдвига массы обеспечивает стабильное удержание воздушных пузырьков, максимальный диаметр которых пропорционален этому напряжению τ_0:

$$d = c\tau_0/\Delta\rho, \tag{6.2}$$

где c — постоянная, зависящая от объема массы; $\Delta\rho$ — разность плотностей суспензии и газа.

Регулирование объема вовлеченного воздуха и характеристик получаемой пористости может осуществляться за счет следующих технологических факторов: выбора ПАВ, оптимизации его дозировки, направленного регулирования реологических свойств поризуемой массы, изменения гидродинамических условий перемешивания. Выбирать ПАВ следует с учетом pH массы, ее дисперсности, предельных значений поризации, кинетики набора структурной прочности массы.

На размер пор при воздухововлечении и общий объем поризации большое влияние оказывают условия перемешивания массы. Анализ вероятности дробления воздушных пузырьков при различных гидродинамических условиях перемешивания показывает, что увеличение скорости вращения лопастей до определенного предела способствует дроблению пузырьков воздуха, затем этот эффект исчезает и, наконец, при дальнейшем повышении скорости вращения рабочего органа смесителя в значительной степени возрастает обратный процесс — разрушение пузырьков воздуха и их коалесценция.

В качестве воздухововлекающих добавок (ВВД) используют синтетические ПАВ из группы нефтяных сульфокислот (пенообразователь ПО-1), вещество «Эффект» и комплексные поверхностно-активные вещества (смесь алкилбензосульфокислот, синтетических жирных кислот, эфиров вторичных спиртов), т. е. ПАВ анионоактивного класса.

Дозировка ВВД от 0,05 до 0,15% от массы сухих компонентов обеспечивает воздухововлечение в объеме 70 ... 75%.

Способ аэрирования имеет большие возможности направленного регулирования характеристик пористой структуры материала и, в частности, создания полифракционного распределения пор по размерам. Достигается это изменением гидродинамических условий перемешивания: регулированием скорости вращения смесительного вала, площади поверхности лопастей, их формы, глубины погружения в массу, применением мешалок с несколькими смесительными валами, вращающимися с различными скоростями.

Способ сухой минерализации пены. Эта разновидность способа пенообразования включает следующие основные операции: приготовление «чистой пены», сухую подготовку твердой сырьевой композиции (помол и смешивание минерального вяжущего и кремнеземистого компонента, помол стекла, шамота и т. п.), смешивание пены и минерального порошка, т. е. бронирование пены. Перемешивание пены с тонкодисперсным минерализатором является наиболее ответственной технологической операцией, при проведении которой необходимо учитывать ряд важных факторов.

Минерализация пены основана на прилипании тонкодисперсных твердых частиц к пузырькам пены, вследствие чего образуется сплошная ячеисто-минеральная система. Каждая ячейка в такой системе бронирована большим числом твердых частиц. Прилипание твердых частиц к пузырькам пены обусловлено силами взаимодействия поверхности твердой фазы и полярных групп пенообразователя. На поверхности раздела фаз газ-жидкость и жидкость-твердое вещество наблюдается молекулярное взаимодействие пенообразователей с образованием особых комплексов, которые способствуют прилипанию минеральных частиц к воздушным пузырькам. Степень комплексообразования, устойчивость комплексов, их химические и физико-химические свойства зависят от различных факторов: дипольных моментов полярных групп молекул и их размеров, концентрации реагентов, pH и температуры среды. Стабилизаторами пены могут являться твердые частицы с малым углом смачивания, медленно отсасывающие воду из пены. Разные группы ПАВ могут гидрофобизировать или гидрофилизировать твердые частицы. Гидрофобизирующие ПАВ создают адсорбционные оболочки на поверхности твердых зерен. В этих оболочках молекулы мыла или соответствующих жирных кислот ориентируются своими полярными карбоксильными группами к поверхности зерна, а углеводородными цепями — в окружающую водную среду. Таким образом, твердые частицы делаются с поверхности гидрофобными, плохо смачиваются водой, но легко смачиваются пузырьками воздуха, за счет чего и удерживаются на воздушных пузырьках.

Адсорбционные пленки, образованные гидрофильными коллоидами (сапонин, клей, желатин), наоборот, повышают смачиваемость минерализатора. При этом существенно снижается устойчивость системы, пена разрушается твердыми частицами и минерализующий эффект не достигается. Следовательно, стабилизация пены при ее сухой минерализации прямым образом зависит от природы ПАВ, что снижает круг пенообразователей, пригодных для получения высокопористых материалов этим способом.

Устойчивость минерализованной пены зависит также от вида, количества и дисперсности твердых частиц, введенных в пену. Чем большая поверхность пены покрыта твердыми частицами и чем более они дисперсны, тем устойчивее пена, так как высокодисперсные твердые частицы устойчиво располагаются на поверхности пленки пузырька, в то время как крупные, обладающие большей массой, предрасположены к сдвигу.

Способ сухой минерализации пены эффективен при изготовлении ячеистых бетонов, пеностекла и пенопластов из резольных порошковых полимерных композиций.

Способ удаления порообразователя является одним из старейших в производстве высокопористых материалов. Он характеризуется простотой технологического процесса и имеет ряд разновидностей.

Способ высокого водозатвердения основан на использовании в составе формовочной массы компонентов с высокой водоудерживающей способностью, т. е. на введении в такую массу большого объема воды и испарении ее после образования несущего каркаса. Образование несущего каркаса перед испарением воды необходимо для существенного снижения или полного исключения сушильных усадок, так как только при этих условиях можно получить высокие значения пористости материала.

Большие объемы воды удерживаются массой за счет сорбционных и капиллярных сил. Как известно, этот вид связи относится к слабым механическим взаимодействиям воды с твердыми телами. Поэтому основной объем воды легко удаляется из материала, начиная испаряться уже при 70 . . . 80°С.

Объем воздушной пористости материалов, получаемых этим способом, может быть найден по формуле

$$П_в = \frac{(B + V_{вв}) - (W_t + V_у)}{1000} 100, \qquad (6.3)$$

где B — расход воды; $V_{вв}$ — объем воздуха, оставшийся в массе после формования изделий; W_t — количество воды, связанное химически и физико-химически компонентами массы; $V_у$ — объемная усадка материала при изготовлении.

Одним из основных факторов, обеспечивающих эффективность рассматриваемого способа, является правильный выбор компонентов, составляющих формовочную смесь. Они должны характеризоваться большой водоудерживающей способностью и обеспечивать нерасслаиваемость смеси при ее влажности до 350 . . . 400%. В этом случае может быть получен материал с пористостью выше 90%. В качестве компонентов формовочных масс наиболее широко используют распушенный асбест, диатомит, трепел, известь, бенто-

нит. С целью повышения водоудерживающей способности твердые компоненты подвергают весьма тонкой диспергации. Эффективным приемом удержания в массе большого количества воды является использование в качестве вяжущего водорастворимых полимерных веществ, таких, как крахмал (1,5 ... 3%-ный водный раствор), карбоксиметилцеллюлоза (Na — КМЦ), оксиэтилцеллюлоза и др.

Вторым фактором, определяющим эффективность способа высокого водозатворения, является создание каркаса, препятствующего развитию усадочных деформаций при удалении из материала воды.

Технологически эта задача решается различными путями: твердением вяжущих композиций, введенных в смесь; наполнением смеси неразбухающими зернами или волокнами.

Типичной технологией, основанной на применении способа высокого затворения, является технология асбестосодержащих материалов (асбестоцементных и асбестоизвестково-кремнеземистых). В данном случае каркасообразующий материал (цементный или силикатный камень) синтезируется в результате гидратации клинкерных минералов или взаимодействия между известью, кремнеземистым компонентом и водой. После удаления воды в материале в основном образуется капиллярная пористость. Поэтому такие материалы характеризуются повышенными водопоглощением и гигроскопичностью и применяются главным образом для тепловой изоляции горячих поверхностей.

Так как испарение большого количества воды требует весьма значительных затрат теплоты, то способ высокого водозатворения относится к высокоэнергоемким и подлежит существенному совершенствованию.

В зависимости от вида каркасообразующих элементов структуры получают волокнистую, зернистую, зернисто-капиллярную пористую структуру материалов. Этот способ применяют при получении древесно-волокнистых, торфяных плит, твердых и декоративно-акустических минераловатных плит, а также для устройства мастичной тепловой изоляции из асбестосодержащих масс.

Способ выгорающих добавок основан на введении в формовочную массу и последующем выжигании органических добавок. Способ применим только для получения керамических и огнеупорных высокопористых материалов, так как из материалов другого состава выжигание добавки невозможно.

Физико-химическая сущность порообразования предопределяет ход технологического процесса и характер образующейся пористости. Порообразующая (выгорающая) добавка заданной дисперсности равномерно распределяется в формовочной массе одним из известных способов. Отформованные из этой массы изделия после достижения ими необходимой влажности обжигаются при температуре не ниже температуры выгорания добавки. Если учесть, что приданная при формовании форма изделия и его объем не должны изменяться во время обжига (т. е. должны отсутствовать вспучивание и заметные усадочные явления), то объем образующейся макропористости примерно равен объему введенной в массу выгорающей добавки.

Для получения изделий с заданными пористостью и свойствами необходимо соблюдать ряд обязательных условий. Во-первых, добавка при выгорании не должна выделять большого количества газообразных веществ, могущих привести к вспучиванию обжигаемого материала. Во-вторых, реологические свойства массы должны обеспечивать сохранность формы изделия в период выгорания добавок и не допускать уплотнения массы после удаления порообразователя. В-третьих, газопроницаемость массы при выгорании добавок должна быть достаточной для свободного выхода образовавшихся газов.

При получении огнеупорных высокопористых материалов следует применять такие выгорающие добавки, которые после выгорания образуют минимальное количество золы или дают золу, не содержащую плавней.

Следует также учитывать, что форма зерен выгорающей добавки оказывает существенное влияние на прочность готовых изделий. Наибольшей прочностью характеризуются изделия, при изготовлении которых применяется добавка в виде сферических зерен; наименьшей — при использовании опилок. После выгорания опилок в материале образуется сеть сообщающихся пор продолговатой формы. Такая пористость кроме снижения прочности существенно увеличивает теплопроводность материала, особенно при высоких температурах.

По этим причинам введение в поризуемые массы опилок более 65% по объему невозможно. В настоящее время их применение в качестве выгорающих добавок резко сокращено. Кроме того, они являются ценным сырьем в химической промышленности.

Применяющиеся традиционные выгорающие добавки (лигнин, термоантрацит, отсевы коксика, полукокс) также не позволяют получать изделия с объемом пористости >72%. Более высокую пористость обжиговых теплоизоляционных материалов (до 80 ... 85%) можно получить путем применения в качестве порообразующей добавки мелких фракций (менее 0,5 мм) бисерного полистирола.

Особого внимания заслуживает в этой связи разработанный в МИСИ им. В. В. Куйбышева способ самоуплотняющихся масс. Его сущность состоит в использовании давления вспенивающихся внутри массы зерен полистирола. Введенный в формовочную смесь в заданном количестве подвспененный полистирол в процессе окончательного вспенивания (при сушке) производит уплотнение поризуемой подвижной массы, помещенной в перфорированную замкнутую форму, и выжимает из нее до 70% воды затворения. При этом достигаются выштамповывание изделия заданной формы, уплотнение каркасообразующего материала (межпоровых перегородок) и безусадочная сушка изделий, которая может произво-

диться контактным способом (в сушилках) или электропрогревом. Во время обжига полистирол выгорает, образуя сферические поры. Малая средняя плотность полистирола 30 ... 45 кг/м³ предопределяет выделение небольших количеств газовой фазы и полное его удаление из материала (без образования зольного остатка), что делает порообразователь высокоэффективным. Высокопористые изделия, полученные этим способом, характеризуются повышенной (на 20 ... 30%) прочностью и полидисперсной пористой структурой. Механическое отжатие из массы основного количества воды затворения резко сокращает расход теплоты на сушку и делает этот способ малоэнергоемким.

Следует отметить, что способ самоуплотняющихся масс универсален. Его с успехом используют для получения теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных изделий (полистиролцементных, полистиролгипсовых). В этом случае вспененный полистирол является компонентом материала.

Неплотная упаковка — способ придания волокнистым и зернистым материалам повышенных теплоизоляционных свойств, основанный в направленном формировании волокнистой и зернистой пористости, что достигается различными методами, зависящими от характеристик исходного материала.

При использовании волокнистых материалов стремятся получать изделия, характеризующиеся некоторой прочностью, обеспечивающей их транспортирование и монтаж. В этом случае для неплотной упаковки волокон и достижения необходимой прочности системы применяют в основном три принципа: механическое связывание длинноволокнистых материалов (соломы, камыша, стеблей сухих водорослей) проволокой, жгутами и т. п.; свойлачивание сухих или увлажненных коротко- и средневолокнистых (длина волокон до 20 ... 30 мм) материалов (шерсти животных, синтетических и минеральных волокон) и свойлачиваемость способом высокого водозатворения (древесные волокна, волокна асбеста). Прочность материалам, получаемым способом свойлачивания, придается за счет перепутывания волокон, уплотнения волокнистой системы, т. е. за счет механического сцепления и трения волокон между собой. Этим способом, например, изготовляют войлок из природных шерстяных волокон — материал с высокими теплоизоляционными и механическими свойствами. В валяльно-войлочном производстве свойлачивание является одним из важнейших этапов технологического процесса — этапом предварительного уплотнения полуфабриката, достигаемого путем трения и давления при одновременном воздействии теплоты и влаги.

Изделия, получаемые при свойлачиваемости волокон животного происхождения, обладают высокой прочностью на разрыв и высокой формоустойчивостью, что объясняется спецификой их строения: чешуйчатой поверхностью, конусностью, высокой упругостью, набухаемостью и последующим сжатием, способностью извиваться и перемещаться.

[illegible]
[illegible]
они у них слабо выражены, поэтому изделия из них, полученные способом свойлачивания, характеризуются невысокими прочностью, жесткостью и формоустойчивостью.

Наиболее широко метод свойлачивания применяют при производстве минераловатных матов и в виде способа высокого затворения в технологии древесно-волокнистых и торфяных плит.

Свойлачивание минеральных волокон в камере волокноосаждения основано на хаотической их ориентации в процессе полета после волокнообразования и переплетении при укладке на под камеры (сетчатый конвейер). Способствует повышению зацепляемости волокон друг с другом наличие изогнутых волокон. В результате образуется минераловатный ковер, обладающий связанностью и некоторой прочностью при разрыве. Подпрессовка ковра, упаковка его в покровные рулонные материалы (крафт-бумагу, импрегнированную бумагу, пергамин, фольгу и т. п.) в сочетании с прошивкой текстильной стеклянной или синтетической нитью существенно повышают прочностные свойства материала, который широко используют в виде гибких матов для тепловой изоляции зданий и оборудования.

Свойлачиваемость методом повышенного водозатворения обеспечивается хаотическим расположением и переплетением органических и минеральных волокон в изделиях, формуемых из гидромасс. Содержание волокон в гидромассе обычно находится в пределах 2 ... 10%. Это обеспечивает свободную ориентацию волокон в пространстве и равноплотность их укладки по мере обезвоживания массы, которое порисходит за счет свободного гидростатического истечения воды. Последующие вакуумирование, подпрессовка и сушка массы закрепляют хаотическое расположение волокон за счет усиления трения и механического зацепления изогнутых волокон.

В результате изделие приобретает прочность, определенные жесткость и формоустойчивость.

Неплотная упаковка в случае использования зернистых материалов основывается на направленном диспергировании исходного материала и его фракционировании.

Из теории плотной упаковки следует, что в системах, объем которых значительно превышает объем единичного зерна, межзерновая пустотность не зависит от размеров зерен, а определяется их гранулометрическим составом. Однако для теплоизоляционных материалов (в данном случае засыпок) размер зерна имеет весьма существенное значение, ибо этот параметр определяет величину межзерновых пустот, размер площади контактов между зернами и их количество, и как следствие,— показатель теплопроводности материала. Поэтому создавая из зернистых структурообразующих элементов теплоизоляционный материал методом неплотной упаковки, стремятся уменьшить размер зерен и привести их грануло-

1*

метрию к узкофракционному составу (идеальную — к одноразмерным зернам). Расширение гранулометрии зерен всегда приводит к снижению межзерновой пористости (пустотности), которая, как показывает практика, при однофракционном составе и хаотическом расположении зерен достигает 55 ... 60%.

Увеличения общей пористости до 90% и более достигают применением высокопористых гранул (вспученного перлита, стеклопора, керамзита и т. п.).

Для придания теплоизоляционным засыпкам некоторой прочности и стабильности объема их подвергают уплотнению, например, вибрацией. При этом несколько снижают их межзерновую пористость.

Диспергирование и фракционирование широко используют для подготовки пористых компонентов в производстве теплоизоляционных изделий из зернистых композиций.

При диспергировании природных и искусственных пористых материалов предпочтительнее использовать помольное оборудование ударного действия: молотковые дробилки, дезинтеграторы, а также валковые дробилки. Этот тип машин позволяет получать зернистые системы с гранулометрическим составом, близким к монофракционному, а также в наименьшей мере разрушает пористую структуру самих зерен.

Контактное омоноличивание — способ, широко распространенный в производстве теплоизоляционных и акустических материалов. Примерно 50% всех высокопористых строительных изделий изготовляют этим способом: изделия из минеральной и стеклянной ваты на синтетическом связующем, жаростойкие изделия из огнеупорных волокон на керамическом и кремнийорганическом связующих, изделия из керамзита, перлита, стеклопора и других пористых заполнителей на минеральных и полимерных связующих.

Способ контактного омоноличивания целесообразно применять в случае использования относительно крупнозернистых и длинноволокнистых структурообразующих элементов (диаметр зерен не менее 3 ... 5 мм; длина волокон не менее 10 ... 15 мм). При использовании более мелких исходных материалов резко возрастает их поверхность и соответственно возрастает расход связующего; снижается пористость, возрастают средняя плотность и теплопроводность; возникают условия для заполнения мелких пор связующим.

В основе способа контактного омоноличивания лежат общие принципы склеивания двух контактирующих поверхностей тонкими клеевыми прослойками. Качество любого клеевого соединения определяется двумя основными параметрами: адгезией клеевой композиции к поверхности склеиваемых частиц и когезионной прочностью самой клеевой прослойки после ее затвердевания.

Прочность и долговечность контактной зоны и в целом изделия, полученного контактным омоноличиванием, зависят от следующих физико-химических и технологических факторов: природы склеиваемых частиц и состояния их поверхности, природы клеящих композиций, толщины клеевого шва (расстояния между контактирующими поверхностями), площади контакта, эксплуатационных факторов, действующих на изделие (температуры и характера среды, цикличности их изменения), стойкости клеевых соединений и самих структурообразующих элементов к эксплуатационной среде и изменения ее параметров.

Адгезия — это связь между приведенными в контакт разнородными поверхностями. Причиной возникновения адгезионной связи является действие межмолекулярных сил или сил химического воздействия. Адгезия обусловливает склеивание твердых тел с помощью клеящего вещества — адгезива.

Когезия — сцепление молекул вещества между собой под действием сил притяжения различной природы. Специфичность когезионных свойств полимеров, широко используемых в качестве адгезивов, определяется совокупностью взаимодействия атомов или звеньев микромолекул. Энергия межмолекулярного взаимодействия и, как следствие, механические свойства пленок клеевого соединения зависят прежде всего от типа и числа атомных групп, входящих в состав молекулярной цепи, а также от геометрической формы и длины макромолекулы. Кроме того, на когезионную прочность клея влияют структурные особенности. Повышению когезионной прочности способствует ориентированное состояние полимерных пленок, рост степени полимеризации, введение активных наполнителей — твердых высокодисперсных хорошо смачивающихся тел.

Взаимодействие адгезива (клея) с твердой поверхностью (физическое или химическое) определяет характер деформаций и разрушения омоноличенного материала, его стойкость в той или иной среде и многие другие свойства.

Связи, образующиеся при адгезии, включают ван-дер-ваальсовы силы, комбинацию ионных и ковалентных связей, водородные связи, процессы хемосорбции, физической адсорбции или комбинацию обоих явлений, диффузию одной фазы в другую под влиянием теплоты, давления, растворителя или их комбинации, т. е. процесс образования адгезионных связей весьма сложный и многофакторный.

В настоящее время общепризнано, что в большинстве случаев адгезия является специфической, т. е. превалирующее значение имеет химическая природа адгезива и твердой поверхности.

Установление прочной связи между адгезивом и твердой поверхностью возможно лишь в том случае, когда сам адгезив обладает высокой когезионной прочностью. Адгезионные и когезионные свойства, а следовательно, и клеящая способность композиций определяются прежде всего строением и структурой отдельных звеньев, составляющих макромолекулу. При этом большое значение имеют молекулярная масса соединения клеевой основы, нали-

чие и природа растворителей, пластификаторов, наполнителей, а также условия формирования клеящих пленок. Указанные факторы следует рассматривать лишь во взаимосвязи с химической природой и состоянием поверхности склеиваемых материалов.

Оптимизация технологии контактного омоноличивания и свойств изделий, получаемых этим способом, базируется на законах физической химии поверхностных явлений на границе раздела фаз адгезив — твердая поверхность. К ним относятся явления смачивания, адсорбция, собственно адгезия и др.

Смачиваемость поверхности является важным свойством, которое может быть охарактеризовано критическим поверхностным натяжением смачивания (ν_c). Полнота смачивания клеем соединяемых поверхностей зависит от соотношений поверхностных натяжений на трех межфазных границах: клей — воздух ($\nu_к$), твердая поверхность — воздух ($\nu_п$) и клей — твердая поверхность ($\nu_{кп}$). Клей полностью смачивает материал при $\nu_к > \nu_c$. Если $\nu_к < \nu_c$, то смачивание неполное и увеличивается по мере уменьшения разности $\nu_к - \nu_c$. Поверхностное натяжение клея можно изменить химическим модифицированием его основы путем введения поверхностно-активных веществ, пластификаторов, разбавителей, наполнителей и др. Смачиваемость клеем значительно снижается при загрязнении склеиваемых поверхностей.

Определяющим фактором, влияющим на прочность клеевых контактов, является адсорбция — первичный акт формирования любого клеевого соединения.

Адсорбция полимеров специфична и существенно отличается от адсорбции низкомолекулярных веществ. Основное отличие состоит в том, что вследствие большой молекулярной массы адсорбируемых молекул только относительно небольшая часть полимерных звеньев связывается с твердой поверхностью, в то время как большая часть молекул располагается в клее и не связана адсорбционными силами с поверхностью.

Влияние молекулярной массы полимера на адсорбцию также специфично и зависит от растворителя и пористости твердой поверхности. Для материалов с плотной поверхностью адсорбция, как правило, увеличивается с ростом молекулярной массы. На пористой же поверхности с малым размером пор адсорбируются низкомолекулярные фракции.

Рассмотренные особенности адсорбции очень важны с точки зрения механизма фомирования поверхностных слоев, понимания механизма адгезии клея к твердым поверхностям. Учет этих особенностей играет важную роль при выборе вида клея для контактного омоноличивания того или иного твердого материала.

Толщина клеевого слоя оказывает большое влияние как на прочность клеевых соединений и всего изделия, так и на функциональные свойства материала (на его пористую структуру).

Уменьшение толщины клеевого слоя до определенных оптимальных значений способствует повышению адгезионной прочно-

сти. Разрыв клеевого соединения происходит по месту дефектов в слое адгезива. Вероятность же наличия дефектов в слое возрастает с увеличением его толщины. Кроме того увеличение толщины слоя адгезива способствует возникновению в его массе напряжений, связанных с контракцией объема при отверждении клея (адгезива).

Следует, однако, учитывать, что уменьшение слоя адгезива до значений, приближающихся к высоте неровностей поверхности (особенно пористых материалов с сильно развитой поверхностью), влечет за собой неравномерное разрушение пленки адгезива и, следовательно, снижение надежности клеевых контактов.

Оптимизация толщины клеевого слоя является важным параметром и с точки зрения функциональных свойств изделий, получаемых способом контактного омоноличивания. Уменьшение толщины клеевого соединения способствует увеличению пористости материала, улучшению его теплоизоляционных и звукопоглощающих свойств. Снижение средней плотности изделий в этом случае особенно заметно при применении минеральных связующих. При использовании полимерных композиций сокращается расход смол и, как следствие, существенно снижается себестоимость готовой продукции.

Таким образом, получение высокопористых изделий контактным омоноличиванием должно обеспечивать равномерное нанесение на волокна или зерна каркасообразующего материала пленки связующего минимальной толщины, достаточной для образования прочных контактов. В связи с этим основными технологическими факторами, влияющими на формирование структуры и свойства получаемых материалов, являются: реологические свойства связующего, определяющие в значительной степени толщину адгезионного соединения; расход связующего, обусловливающий объем межзерновых пустот; вид, размеры и фракционный состав частиц каркасообразующего материала, от которых зависят характер и величина общей пористости материала.

Реологические свойства связующих на основе минеральных и полимерных композиций зависят от их состава и условий переработки. Так, водосодержание цементного теста и технология формования определяют толщину пленки на поверхности зерен. При этом предел водоудерживающей способности цементного теста соответствует резкому уменьшению толщины поверхностной пленки в связи с потерей цементным тестом связности.

Расход связующего на основе минеральных и полимерных композиций находится в прямой зависимости от следующих основных факторов: толщины клеевой пленки, зависящей от реологических свойств связующего, характера поверхности каркасообразующего материала, его сорбционной способности; удельной поверхности омоноличиваемых частиц; технологии переработки композиций в изделия.

Для максимального сокращения расхода связующего предпоч-

тительно использовать элементы каркасообразующего материала относительно крупных размеров монофракционного состава с плотной поверхностью и характеризующиеся достаточной прочностью.

Технология формования изделий должна обеспечивать нанесение клеевой композиции тонким слоем или удаление избытка клея из массы механическими, динамическими способами, вакуумированием или сочетанием этих воздействий.

Объемное омоноличивание — способ, предполагающий полное заполнение пустотности между каркасообразующими элементами структуры связующим веществом, т. е. получение материала со слитной структурой. Поэтому для получения изделий с низкой средней плотностью и высокими функциональными свойствами в этом случае необходимо использование каркасообразующего материала, характеризующегося высокой пористостью. Наиболее широкое применение для получения высокопористых изделий способом объемного омоноличивания нашли зернистые материалы, пористость которых, как правило, превышает 80% (вспученные перлит и вермикулит, полые стеклянные и керамические гранулы, высокопористые полимерные гранулы, стеклопор).

В связи с различием принципов создания высокопористых структур требования к гранулометрическому составу каркасообразующего материала при контактном и объемном омоноличивании принципиально отличны. Для увеличения общей пористости основной ее носитель (каркасообразующий материал) должен занимать в композиции как можно больший объем. Следовательно, с позиций теории плотных упаковок он должен иметь полифракционный состав, т. е. характеризоваться наименьшей межзерновой пустотностью, определяющей расход связующего и, как следствие, среднюю плотность, пористость и взаимосвязанные с ними другие свойства изделий.

Рассматривая зависимость прочностных характеристик материалов, полученных объемным омоноличиванием, от их структуры, необходимо обратить внимание на следующие обстоятельства.

Эти материалы являются гетерогенными системами, структура которых представляет собой две взаимопроникающие матрицы — каркасообразующий контактирующий наполнитель и связующее, заполняющее весь объем межзерновых пустот. Оба компонента в большинстве случаев существенно отличаются по прочности и упругим свойствам, что является основной причиной возникновения неоднородности, концентрации напряжений и деформаций на границе раздела компонентов при механических или тепловых воздействиях.

При увеличении прочности компонентов прочность таких материалов обычно возрастает. Однако в ряде случаев может иметь место обратное явление. Это происходит при определенных сочетаниях свойств составляющих и условий разрушения. Например,

возможно разрушение в первую очередь наиболее прочного компонента при возникновении в нем высокой концентрации напряжений.

Учитывая особенности материалов, получаемых объемным омоноличиванием, можно констатировать, что их физико-механические свойства находятся в зависимости от следующих параметров их структуры и состава: объемного содержания компонентов (заполнителя и связующего), их прочностных и упругих свойств, прочности сцепления связующего с заполнителем.

Способ объемного омоноличивания, позволяющий получать материалы с максимальной плотностью упаковки заполнителя и структурой, образованной из двух взаимопроникающих матриц, открывает большие возможности для создания гаммы материалов с заранее заданными свойствами. При этом есть два пути использования структурных особенностей такой системы для целенаправленного регулирования свойств: применяя прочные высокомодульные заполнители, можно достичь минимального расхода связующего или, наоборот, применяя сверхлегкие заполнители, характеризующиеся низкими прочностью и упругостью, можно получать высокоэффективные теплоизоляционные материалы на прочном связующем. В последнем случае прочность изделия обеспечивается связующим, т. е. разрушение заполнителя не приводит к разрушению материала.

Способ объемного омоноличивания позволяет использовать мелкозернистые компоненты. Однако оптимальное соотношение различных фракций заполнителя находится во взаимосвязи с видом и реологическими характеристиками связующего. Например, увеличение содержания мелких фракций сверх оптимального, т. е. когда имеет место раздвижка ими более крупных зерен, приводит к повышению расхода связующего, ухудшению его реологических характеристик, снижению однородности смеси и, как следствие, к повышению средней плотности материала.

На физико-механические свойства материала, получаемого способом объемного омоноличивания, существенное влияние оказывают поверхностные свойства заполнителя. Шероховатая пористая поверхность способствует улучшению сцепления между зернами заполнителя и связующим, что является необходимым условием совместной работы двух компонентов. Если прочность адгезионного соединения превышает прочность наименее прочного компонента, то механические свойства материала повышаются. С другой стороны, развитая поверхность заполнителя требует повышенного расхода связующего на единицу поверхности и, как правило, вызывает увеличение средней плотности материала. Все эти факторы необходимо учитывать при проектировании состава формовочных масс.

Способ объемного омоналичивания наиболее эффективен для получения теплоизоляционных материалов, в то время как контактное омоноличивание позволяет получать и эффективные зву-

копоглощающие материалы. Это объясняется характером образующейся пористой структуры (см. гл. 5).

Формирование структуры материалов, получаемых объемным омоноличиванием, представляет собой совокупность процессов совмещения связующего с заполнителем, перераспределения связующего в объеме межзерновых пустот заполнителя, формования и отверждения изделий. Эти факторы зависят от реологических свойств связующего в присутствии заполнителя. Во всех случаях вязкость связующего при объемном омоноличивании, как правило, выше вязкости клеевых композиций, используемых при контактном омоноличивании. Это связано с необходимостью создания сплошной матрицы связующего. В то же время если вязкость связующего превышает оптимальные значения, то затрудняется его равномерное распределение в межзерновых пустотах заполнителя, наблюдается перерасход связующего, снижаются подвижность и формуемость композиций, в конечном итоге приводит к ухудшению свойств готовой продукции.

Применение связующих с низкими значениями вязкости также нецелесообразно вследствие образования большого числа дефектных участков в структуре матрицы связующего.

Существенное повышение теплоизолирующей способности материалов, получаемых объемным омоноличиванием, а также придание им удовлетворительных звукопоглощающих свойств достигают путем применения поризованных минеральных и полимерных связующих, представляющих собой пеносистемы.

Композиции, омоноличивающие заполнитель при вспенивании, должны обладать повышенной вспенивающей способностью, реакционной активностью, пониженной исходной вязкостью. Уровень этих параметров должен назначаться с учетом специфических особенностей используемых заполнителей. Например, при применении химического вспучивания целесообразно использовать композиции связующих, обладающих высокой реакционной активностью, в случае применения сверхлегких заполнителей. Наоборот, при использовании более тяжелых заполнителей возможно применение связующих композиций с меньшей реакционной активностью, но при этом необходим подогрев заполнителя.

При поризации матрицы связующего необходимо учитывать потерю прочности этого компонента композиции, особенно при использовании особо легких заполнителей, и применять такие виды связующего, которые при высокой степени поризации обеспечивали бы необходимую прочность материала.

Регулирование реологических характеристик связующих композиций и их вспенивающей способности путем введения в них пластификаторов, разбавителей, газообразователей и др., изменения температурных условий процесса поризации связующего позволяет получать материалы с заданным комплексом физико-технических и эксплуатационных свойств.

Способ создания комбинированных структур применяют для улучшения функциональных свойств теплоизоляционных и акустических материалов. Широко используют способы формирования комбинированных структур — зернисто-ячеистых, зернисто-волокнистых и др. Примером создания комбинированных структур является технология асбестовермикулитовых изделий. В этом случае в получаемом материале сочетаются пластинчатая пористая структура зерен вермикулита, волокнистая структура асбеста и межзерновая пористость (пустотность), возникающая при контактном омоноличивании зерен вермикулита и волокон асбеста глиняной или крахмальной связкой. Зернисто-волокнистая структура образуется при контактном омоноличивании гранулированной минеральной ваты полимерным или глиняным связующим. Рассмотренный выше способ объемного омоноличивания с помощью поризованного связующего также создает возможность получения комбинированных структур.

В основе создания таких структур лежат описанные выше физико-химические и технологические принципы поризации. Совмещение различных структур в материале позволяет не только повысить общий объем пористости, но и изменить ее характеристики в нужном направлении, а также повысить общестроительные свойства материалов: прочность, вибростойкость, термостойкость, стойкость по отношению к воде и др.

Основным направлением развития технологии при получении высокопористых материалов любым из рассмотренных способов является совмещение двух или нескольких технологических процессов в одной технологической операции, что позволяет резко сократить затраты труда и снизить энергоемкость производства. Примером таких технологических приемов могут служить совмещение мокрого помола исходных компонентов с аэрированием, применение способа самоуплотняющихся масс, основанного на использовании энергии вспенивающегося полистирола и позволяющего объединить процессы поризации смесей, формования изделий и сушку в одной технологической операции.

ЧАСТЬ III

ТЕХНОЛОГИЯ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Неорганические теплоизоляционные материалы и изделия составляют основную часть продукции подотрасли. На их долю приходится более 80% общего объема выпуска теплоизоляционных материалов. Это объясняется распространенностью сырья, возможностью широкого регулирования строительно-эксплуатационных свойств неорганических материалов, применимостью их разновидностей практически в любых условиях эксплуатации.

ГЛАВА 7

ИСКУССТВЕННОЕ МИНЕРАЛЬНОЕ ВОЛОКНО И ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ИЗДЕЛИЯ НА ЕГО ОСНОВЕ

Искусственное минеральное волокно широко применяют для производства теплоизоляционных и акустических изделий. Общий объем материалов и изделий на основе искусственных минеральных волокон составляет более 60% от выпуска теплоизоляционных и акустических материалов всех видов. В зависимости от сырья и способа производства искусственное минеральное волокно можно подразделить на следующие разновидности: волокно минеральное с температурой применения до 600°C (рядовое); волокно стеклянное (стекловолокно) с температурой применения до 400°C; высокотемпературостойкое и огнеупорное волокно с температурой применения соответственно до 1000 и выше 1000°C.

Продукт в виде бесформенной волокнистой массы получил название минеральной или стеклянной ваты, в зависимости от химического состава исходных силикатных расплавов. Стеклянная вата характеризуется более высоким содержанием кремнезема и щелочей.

7.1. Минеральная вата

Минеральная вата — рыхлый материал, состоящий из тонких (1 ... 15 мкм) волокон стекловидной структуры. Технология минеральной ваты включает следующие процессы: подготовку сырья, плавление сырья и получение силикатного расплава, переработку расплава в волокно, формирование минераловатного ковра, рулонирование полученного ковра.

Сырьевые материалы для минераловатного производства достаточно разнообразны и имеются в стране в большом количестве. Для изготовления минеральной ваты применяют промышленные отходы, попутные продукты производств, горные породы. К сырью для производства минеральной ваты предъявляют следующие основные требования: оно должно иметь определенный химический состав, обеспечивающий стойкость волокна против действия эксплуатационных факторов (влаги, температуры); невысокую температуру получения расплава, достижимую в применяющихся для этих целей плавильных агрегатах; образовывать силикатные расплавы, характеризующиеся необходимыми для волокнообразования реологическими показателями; быть распространенным и не требовать сложной предварительной подготовки.

Перечисленные требования обычно обеспечиваются составлением соответствующей смеси (шихты), включающей два или более компонентов. Лишь немногие виды природного сырья могут быть использованы для получения минеральной ваты без подшихтовки.

Доменные шлаки являются одним из основных видов сырья для производства минеральной ваты. Они представляют собой расплавы (жидкие и охлажденные), в которых кристаллизуются силикаты и алюмосиликаты. В зависимости от содержания составляющих их оксидов (SiO_2, Al_2O_3, CaO и MgO) шлаки разделяют на основные, когда модуль основности

$$M_0 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} > 1, \qquad (7.1)$$

кислые ($M_0 < 1$) и нейтральные ($M_0 = 1$).

В состав шлаков входят шесть главнейших оксидов, содержание которых, % по массе, колеблется в следующих пределах: SiO_2—35 ... 40; Al_2O_3—10 ... 15; CaO — 35 ... 45; MgO — 5 ... 10; Fe_2O_3 + FeO — 0,5 ... 1,0.

Ваграночные шлаки в ряде случаев являются подходящим сырьем для получения минеральной ваты. Их можно применять как в качестве компонента шихты для подкисления доменных шлаков, так и в качестве основного сырья однокомпонентного состава. Содержание оксидов, % по массе, в этих шлаках находится в следующем соотношении: SiO_2—40 ... 49; Al_2O_3 — 17 ...19; CaO—19 ... 32; MgO—3 ... 4; Fe_2O_3—3 ... 5.

Мартеновские шлаки являются основными. Содержание в них SiO_2 и Al_2O_3 не превышает 40%. Кроме того, в их составе обычно содержится до 20% оксидов железа и марганца. Их используют в качестве добавки к доменным шлакам или горным породам с целью снижения вязкости расплава.

Металлургические шлаки используют в охлажденном виде (отвальные шлаки) и в огненно-жидком состоянии. В последнем случае существенно снижаются затраты топлива на производ-

ство минеральной ваты, однако существенные трудности корректировки состава огненно-жидких шлаков сдерживают развитие этого вида их переработки.

Зола тепловых электростанций — вид сырья, характеризующийся непостоянством химического состава и зависящий от вида сжигаемых углей. Однако проведенные исследования показали возможность ее переработки в минеральную вату в электропечах.

Отходы керамического и силикатного производства используют в качестве одного из компонентов для регулирования химического состава шихты.

Горные породы могут применяться в чистом виде или в качестве компонента шихты. К числу лучших горных пород для производства минеральной ваты относят изверженные горные породы габбро-базальтовой группы и подобные им по химическому составу метаморфические горные породы, а также мергели. Запасы этих горных пород в СССР огромны.

Содержание оксидов в составе горных пород, применяемых для производства минеральной ваты, обычно колеблется в следующих пределах, % по массе: SiO_2—45 ... 65; Al_2O_3—10 ... 20; CaO—5 ... 15; F_2O_3+FeO — 10 ... 15; Na_2O+K_2O — 1 ... 3, хотя в ряде случаев содержание отдельных оксидов выходит за указанные пределы.

Габбро-базальтовые горные породы (диабазы, базальты, габбро), а также их метаморфические аналоги (амфиболиты, известковистые сланцы), мергели являются оптимальным сырьем для минераловатного производства. Получаемая из них вата характеризуется повышенной эксплуатационной стойкостью.

Кислые горные породы типа гранита, перлита, грандиорита образуют расплавы с более высокой вязкостью, чем габбро-базальтовое сырье. В результате этого требуется повышенный расход топлива, снижается производительность плавильных агрегатов. Этот вид горных пород целесообразно применять для повышения белизны волокна при его использовании, например для получения декоративно-акустических изделий. Пока в отечественной практике эти горные породы в чистом виде применения не нашли.

Физико-химические основы получения силикатных расплавов с заданными свойствами являются теоретической базой технологии искусственных минеральных волокон. Технология минеральной ваты, равно как стекловолокна и некоторых видов жаростойких волокон, предполагает стекловидное (стеклообразное) состояние готового продукта. Это особое состояние вещества, отличающееся как от кристаллического, так и от аморфного состояния. Оно характеризуется наличием в веществе кристаллитов — микрокристаллических образований, которые имеют сравнительно правильную кристаллическую решетку во внутренней части и деформированную во все большей степени по мере удаления от центра. В стекле кристаллиты разделены аморфной прослойкой. Характерным для такого состояния вещества является то, что процесс превращения его из жидкого состояния в стекловидное является обратимым, а процесс перехода из стекловидного состояния в кристаллическое необратимым, т. е. из кристаллических веществ нельзя получить стекла без их расплавления (рис. 7.1). Таким образом, стекловидное состояние вещества является метастабильным (неустойчивым). Неустойчивое состояние молекулярных групп у вещества, находящегося в стекловидном состоянии, может привести к тому, что избыточная потенциальная энергия, скрытая в стекле, как в переохлажденной жидкости, при соответствующих условиях перейдет в явную форму, сопровождаясь определенной ориентацией молекул и превращением стекловидного вещества в кристаллическое. Такой процесс называют *рекристаллизацией* или *расстекловыванием*. При этом стекло теряет свои основные свойства: прозрачность, прочность, твердость. Одной из главных причин рекристаллизации стекла является продолжительное воздействие на него повышенных температур. Такие условия могут иметь место при изоляции минеральным волокном горячих объектов. Склонность минерального волокна к рекристаллизации зависит от его химического состава и усиливается по мере перехода от кислых составов к основным.



Рис. 7.1. Схема превращения вещества

Далеко не все вещества способны из расплавленного состояния переходить в стекловидное, минуя процесс кристаллизации. Из жидкого состояния в твердое кристаллическое переходят такие расплавы, вязкость которых невелика, и при охлаждении вплоть до момента кристаллизации медленно возрастает. Для высоковязких расплавов по мере их охлаждения характерен путь не кристаллизации, а стеклообразования. К таким высоковязким веществам, называемым стеклообразователями, относят SiO_2, B_2O_3, $Na_2Si_2O_5$.

Так как в расплавах для получения минерального волокна в качестве стеклообразователя обязательно присутствует SiO_2, то речь пойдет о силикатных расплавах. При получении силикатных расплавов протекают сложные физико-химические процессы, характер которых определяется составом шихты и температурой. Во всех случаях происходят процессы силикато- и стеклообразования. Силикатообразование начинает протекать между материалами, составляющими исходную шихту, уже в твердом состоянии при относительно низких температурах (400 ... 600°C). Однако скорость реакций при этом невелика. Существенная интенсификация процессов наступает при появлении жидкой фазы, которая образуется в объеме шихты вследствие плавления легкоплавких компонентов и возникновения эвтектик.

Возможность химического взаимодействия определяется законами химической термодинамики, а при наличии благоприятных термодинамических условий — действием кинетических факторов, к которым в первую очередь относится поверхность контакта. Чем больше площадь непосредственного контакта зерен компонентов, тем быстрее протекает процесс силикатообразования. Как известно, площадь поверхности контактов для шихты одного и того же объема возрастает с увеличением дисперсности зерен. Следовательно, измельчение компонентов шихты способствует ускорению реакций силикатообразования и гомогенизации расплава, которая необходима для получения стабильных свойств волокна.

Для перевода твердой фазы в жидкое состояние необходимо затратить энергию на преодоление сил, действующих между элементами решетки. Плавление наступает тогда, когда средняя энергия колебаний элементов решетки достаточно велика для нарушения связи между ними. До недавнего времени считалось, что структура жидкости даже при температурах, близких к температуре кристаллизации, лишена какой-либо упорядоченности. В действительности в отличие от кристаллов так называемый «дальний порядок» в расположении молекул или атомов в жидкости отсутствует. Однако есть «ближний порядок», т. е. имеет место правильность расположения частиц в непосредственной близости от любого данного атома (молекулы), затухающая с расстоянием.

В настоящее время наиболее часто силикатные расплавы рассматривают как ионные жидкости. Стеклообразователем или сеткообразователем является кремниевая кислота. Установлено, что из всех связей O^{-2} связь с Si^{+4} самая прочная. Этим и обусловлено существование кремнийкислородных комплексов как самостоятельных структурных единиц кристаллической решетки. При плавлении силикатов их решетка разрушается из-за разрыва более слабых связей между катионами и кремнийкислородными анионами. Наличие жесткой ковалентной связи Si—O определяет присутствие в силикатных расплавах устойчивых комплексов ионов (Si_xO_y), образующих анионный скелет расплава. Внутри этого каркаса преобладают ковалентные, а вне каркаса — ионные связи.

Структура силикатных расплавов определяет их свойства. Их вязкость зависит от подвижности анионного каркаса, а электропроводность — от подвижности ионов-модификаторов (т. е. ионов с малым зарядом и большим размером, например щелочных и щелочеземельных), поляризующих связи Si—O.

Основными свойствами силикатных расплавов, влияющими на свойства минеральных волокон, получаемых из них, являются вязкость, поверхностное натяжение и кристаллизационная способность.

Вязкость — одно из основных свойств силикатных расплавов. Силикатные расплавы, если они не содержат кристаллических взвешенных частиц, ведут себя как нормальные ньютоновские жидкости. При температурах ниже верхнего предела кристаллизации в них наблюдаются признаки структурирования, что приводит к ухудшению качества волокна.

С повышением температуры вязкость силикатных расплавов понижается вследствие усиления броуновского движения, ослабления и разрыва связей между структурными группами и распада ассоциаций; охлаждение расплавов вызывает обратные изменения (рис. 7.2).

Характер изменения вязкости расплавов от температуры определяется их составом. По характеру изменения вязкости различают длинные и короткие расплавы. Для длинных расплавов характерен большой интервал вязкости, т. е. большая разница температур жидкотекучего состояния и перехода в хрупкое состояние. Короткие расплавы имеют малый интервал таких температур, т. е. короткий интервал вязкости (рис. 7.3). Для переработки расплавов в волокно лучше применять длинные расплавы.

Поверхностным натяжением σ, Н/м, называют работу, которую необходимо затратить на образование единицы новой поверхности в плоскости раздела двух фаз при постоянной температуре. Этот показатель характеризует интенсивность межмолекулярных (межатомных, межионных) сил в расплаве. На поверхностное натяжение существенно влияют изменения в поверхностном слое. Поэтому адсорбционные процессы сопровождаются изменением поверхностного натяжения. Из формулы Гиббса

$$\Gamma = \frac{C d\sigma}{RT dC}, \quad (7.2)$$

где Γ — удельная адсорбция, моль/см²; C — концентрация растворенного вещества в разбавленном растворе. Адсорбция положительна, когда производная $d\sigma/dC$ отрицательна. Вещества, для которых $d\sigma/dC<0$, называют поверхностно-активными, так как они понижают поверхностное натяжение, адсорбируясь в поверхностном слое (на границе раздела) жидких или твердых веществ.

А. А. Аппен разделил оксиды силикатных расплавов по воздействию на поверхностное натяжение на три группы: поверхностно-неактивные: SiO_2, TiO_2, Al_2O_3, Na_2O, MgO, MnO, CaO, FeO; имеющие промежуточный характер: K_2O, B_2O_3; поверхностно-активные: Cr_2O_3, CrO_3, SO_3, V_2O_5, WO_3. Из оксидов, присутствующих в силикатных расплавах, более сильно поверхностное натяжение снижают SiO_2 и Na_2O.

Поверхностное натяжение силикатных расплавов значительно меняется в интервале температур, соответствующих размягчению материала (600 ... 750°С) — от 10 до 0,25 Н/м, а при высоких температурах изменение σ от T незначительно. Снижение поверхностного натяжения благоприятно влияет на ход волокнообразования.

Появление кристаллической фазы в расплаве отрицательно сказывается как на процессе волокнообразования, так и на термоустойчивости волокна. *Кристаллизационная способность* силикат-

ных расплавов подчиняется определенной закономерности: минимум кристаллизационной способности соответствует составам, в которых в качестве первых фаз из расплавов выделяются одновременно два или несколько видов кристаллических соединений разного состава. Им соответствуют эвтектические точки, границы полей на диаграммах состояния. Для предотвращения или ослабления кристаллизации необходимо ввести в состав расплава любой оксид, не входящий в состав первой кристаллической фазы и не

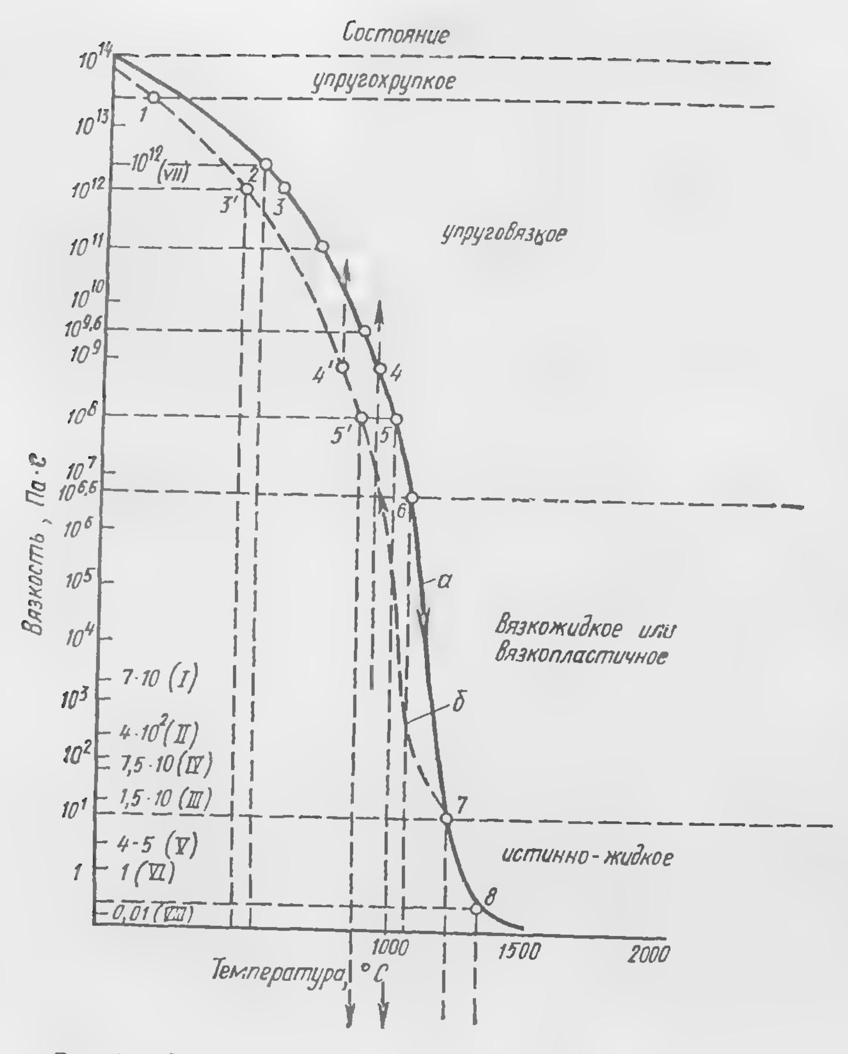


Рис. 7.2. Зависимость вязкости силикатного расплава от температуры:

а — при плавлении; *б* — при охлаждении. Уровни: *I* — прекращение вытягивания волокон; *II* — максимальная вязкость при разделении расплава на струйки в чаше при центробежно-фильерно-дутьевом способе волокнообразования; *III* — интенсивное вытягивание волокон газовым потоком; *IV* — максимальная вязкость на чаше при центробежно-фильерно-дутьевом способе; *V* — жидкотекучесть расплавов при каменном литье; *VI* и *VII* — начало и окончание образования волокон; *VIII* — образование неволокнистых включений («корольков», стеклосфер)

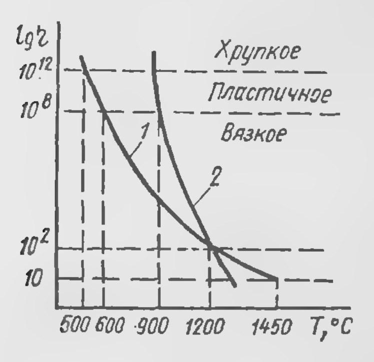


Рис. 7.3. Характер изменения вязкости у длинных (*1*) и коротких (*2*) расплавов

Рис. 7.4. Скорость образования центров кристаллизации (СОЦ) и роста кристаллов (СРК) как функция степени переохлаждения расплава

способный быть затравкой кристаллообразования, или уменьшить содержание оксидов, входящих в состав первой фазы. Самопроизвольная кристаллизационная способность стеклообразующих расплавов определяется двумя факторами: скоростью образования центров кристаллизации (СОЦ) и линейной скоростью роста кристаллов (СРК). Типичный ход изменения СОЦ и СРК показан на рис. 7.4. Ниже температуры плавления T_s, или температуры ликвидуса, расположена метастабильная зона *I*, в которой центры кристаллизации практически не образуются, но рост кристаллов возможен, если внесены примесные затравки или зародыши образовались при более низкой температуре. Существование этой зоны объясняется низкой равновесной температурой плавления мелких кристаллов по сравнению с макроскопическими. Лишь после того как система доведена до определенной степени переохлаждения, становится возможным самопроизвольное образование центров кристаллизации. При дальнейшем охлаждении СОЦ и СРК возрастают и достигают максимумов, а затем вновь снижаются, стремясь к исчезающе малым значениям, благодаря тормозящему влиянию высокой вязкости. В отвердевшем стекле кристаллизации не происходит. Низкотемпературная область *II* с практически нулевой СОЦ может считаться второй метастабильной зоной.

Структура и свойства силикатного расплава зависят от его химического состава. В соответствии с ионной теорией влияние различных оксидов на вязкость и температуру кристаллизации силикатных расплавов объясняется следующим. Если катион оксида является комплексообразующим, то рост его содержания в расплаве будет повышать вязкость расплава вследствие увеличения размеров комплексных ионов или повышения их концентрации в расплаве. К таким оксидам относят SiO_2, Al_2O_3, Cr_2O_3. Если катион оксида не является в данных условиях комплексообразующим, то такой оксид, отдавая свой кислород комплексам, уменьшает тем самым их размеры. Поэтому добавление CaO, MgO, MnO, Na_2O, K_2O и TiO_2 уменьшает вязкость расплавов. Одновременно добавление этих оксидов повышает температуру кристаллизации, если образуются прочные связи катион-кислородкомплексных анионов (CaO, MgO, TiO_2), и понижает эту температуру, если связи менее прочные (MnO, Fe_2O_3, Na_2O, K_2O). Это используют на практике для направленного регулирования свойств силикатных расплавов.

Вязкость и поверхностное натяжение силикатных расплавов являются основными свойствами, определяющими способность данного расплава к волокнообразованию. Переработка силикатных расплавов в волокно происходит в интервале температур 1300 ... 1400°C, вязкость при этом должна находиться в пределах 0,5 ... 5 Па·с.

Высокое поверхностное натяжение расплавов способствует образованию неволокнистых включений («корольков») в минеральной вате, причем чем меньше вязкость расплава в период волокнообразования, тем сильнее отрицательное действие поверхностного натяжения. Вместе с тем высокая вязкость затрудняет переработку струи расплава и волокна. Практически значения поверхностного натяжения расплавов, полученных из шихт, применяющихся в минераловатном производстве, составляют 0,3 ... 0,45 Н/м.

Обобщение данных отечественных и зарубежных исследователей о влиянии каждого компонента на свойства расплава и получаемой минеральной ваты позволяет сделать следующие выводы:

SiO_2 — повышает вязкость силикатных расплавов и химическую стойкость волокон в любых средах; удлиняет интервал вязкости; снижает кристаллизационную способность расплавов;

B_2O_3 — оказывает сильное флюсующее действие, уменьшает поверхностное натяжение расплава и температуру верхнего предела кристаллизации, значительно улучшает выработочные свойства расплава, увеличивает длину волокна, повышает устойчивость волокон к воде, но понижает устойчивость к кислотам и щелочам;

Al_2O_3 — повышает вязкость и поверхностное натяжение расплавов, прочность и модуль упругости волокон, устойчивость их к воде, кислото- и температуростойкость;

Fe_2O_3 — снижает вязкость расплавов, повышает их поверхностное натяжение и химическую устойчивость волокон;

CaO, MgO — при высоких температурах понижают вязкость расплавов, повышают склонность к кристаллизации. При содержа[illegible] [illegible] вязкость возрастает вследствие [illegible] ния C_2S. Влияние MgO на снижение вязкости особенно заметно при повышении его содержания до 9% и более. Повышение содержания MgO за счет CaO значительно повышает химическую стойкость волокон;

TiO_2 — улучшает химическую устойчивость ко всем средам, является хорошим плавнем, значительно снижает воязкость расплава, но повышает склонность к кристаллизации;

ZrO_2 — очень сильно повышает химическую устойчивость ко всем средам и является единственным оксидом, который делает многокомпонентные стекла устойчивыми к щелочам; увеличивает тугоплавкость расплава и повышает склонность к кристаллизации;

ZnO — в небольших количествах оказывает положительное влияние на химическую устойчивость, снижает вязкость расплавов и уменьшает склонность к кристаллизации;

FeO — снижает вязкость, но повышает поверхностное натяжение расплавов, снижает начальную температуру разрушения волокон;

Рис. 7.5. Диаграмма вязкости силикатных расплавов при 1400°C

MnO — в небольших количествах увеличивает химическую устойчивость, снижает вязкость и склонность к кристаллизации;

Na_2O, K_2O, LiO — являются плавнями и снижают склонность к кристаллизации, уменьшают стойкость волокон к воде; повышенное содержание K_2O уменьшает поверхностное натяжение расплава.

Расплав для получения минеральной ваты содержит в основном SiO_2, Al_2O_3, CaO, MgO примерно в следующих соотношениях, % по массе: SiO_2 — 35 ... 60; Al_2O_3 — 5 ... 15; CaO — 20 ... 25; MgO — 5 ... 15. В небольшом количестве могут присутствовать Fe_2O_3, FeO, Na_2O, K_2O, MnO.

Вязкость расплава для получения минеральной ваты приближенно можно определить по диаграмме вязкости: SiO_2—Al_2O_3—CaO, если пересчитать MgO на CaO (рис. 7.5). Кривые линии на диаграмме соединяют точки с одинаковыми значениями вязкости расплава при различных содержаниях SiO_2, Al_2O_3, CaO. При 1400°C интервал вязкости, при котором возможно получение волокна из расплава, должен находиться в пределах 0,5 ... 1,5 Па·с.

Температура плавления, кристаллизации и возможный ход кристаллизации могут быть приближенно определены по диаграмме состояния системы: SiO_2—Al_2O_3—CaO (рис. 7.6), а более точно по диаграмме состояния четырехкомпонентной системы: SiO_2—Al_2O_3—CaO—MgO. Однако всегда надо учитывать наличие примесей.

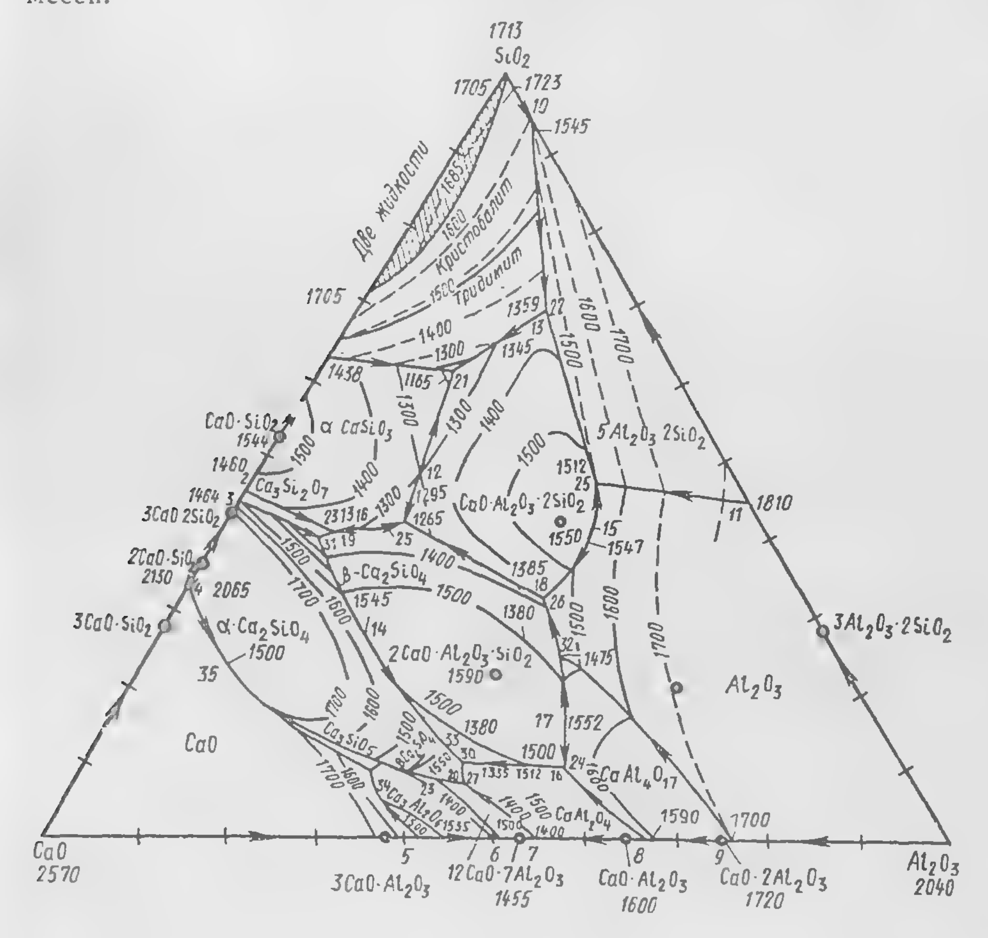


Рис. 7.6 Диаграмма состояний CaO — Al_2O_3 — SiO_2

Свойства минеральной ваты зависят от ряда факторов, важнейшими из которых являются: химический состав силикатного расплава, его вязкость и поверхностное натяжение в момент переработки в волокно, способ и параметры волокнообразования.

В соответствии с современными требованиями минеральную вату выпускают трех марок: 75, 100 и 125 со средней плотностью, определяемой под удельной нагрузкой 0,002 МПа, соответственно 75, 100 и 125 кг/м³.

С увеличением диаметра волокон возрастает теплопроводность минеральной ваты. Поэтому стандартом средний диаметр ограничен не более 6 мкм (для марки 75) и не более 8 мкм (для остальных марок).

Длина волокон колеблется в довольно широких пределах от 2 ... 3 мм до 20 ... 30 см. Из длинноволокнистой ваты получают более высококачественные изделия, характеризующиеся большей упругостью и прочностью.

Помимо волокон вата содержит не вытянувшиеся в волокна включения («корольки»), которые повышают среднюю плотность и увеличивают теплопроводность минеральной ваты. Поэтому содержание корольков размером более 0,25 мм ограничено стандартом: для марок 75—12%; 100—20% и 125—25%.

Водопоглощение минеральной ваты очень велико — до 600% при погружении в воду; гигроскопичность колеблется от 0,2 до 2%. Минеральная вата не является благоприятной средой для развития грибов. Однако под действием органических кислот, выделяемых грибами, она может разрушаться. С повышением кислотности волокон грибоустойчивость минеральной ваты возрастает. Температура спекания рядовой минеральной ваты 700 ... 800°С, соответственно температура применения 600 ... 700°С. Расстекловывание волокон может уже происходить при 500°С. Вата, полученная из более кислых расплавов, меньше подвержена расстекловыванию. Теплопроводность минеральной ваты не должна превышать значений, приведенных в табл. 7.1.

Таблица 7.1. **Теплопроводность минеральной ваты, Вт/(м·°С)**

Температура, °С	Марка ваты		
	75	100	125
25±5	0,042	0,044	0,046
100±5	0,058	0,060	0,062
300±5	0,095	0,102	0,105

Большое влияние на теплопроводность ваты оказывает диаметр волокна, при возрастании которого имеет место увеличение размера пор, создание более благоприятных условий для конвективного переноса теплоты, а также возрастание единичной площади контактов между волокнами. Так, при увеличении диаметра волокон с 3 до 12 мкм теплопроводность повышается на 10%.

Определение состава шихты для производства минеральной ваты включает в себя ряд основополагающих требований. Запасы сырья, позволяющего изготовлять минеральную вату из однокомпонентной шихты без добавок, весьма ограничены. В связи с этим для получения минеральной ваты, соответствующей требованиям стандарта, шихту составляют из двух,

а иногда и более компонентов. Главным критерием при этом является модуль кислотности $M_к$, %:

$$M_к = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO + MgO}, \quad (7.3)$$

который представляет собой отношение содержания в шихте суммы кислотных оксидов к основным. По существующему стандарту модуль кислотности минеральной ваты должен быть не менее 1,5 для высшей и 1,2 для первой категории качества. С повышением $M_к$ возрастает химическая стойкость ваты, в частности водостойкость и, следовательно, долговечность. Водостойкость минеральной ваты характеризуется показателем pH; минеральная вата относится к высшей категории водостойкости при pH<5 и к первой категории при pH<7.

Однако следует помнить, что увеличение $M_к$ и гидролитической стойкости ваты связано с увеличением содержания SiO_2 и Al_2O_3, что приводит к существенному повышению вязкости расплава и влечет за собой снижение производительности и ухудшение условий волокнообразования. В связи с этим при проектировании состава шихты приходится искать оптимальное решение: с одной стороны, не допускать слишком большой вязкости расплава во избежание нарушения технологического процесса, с другой — не допускать низкого содержания в шихте кислотных оксидов в ущерб долговечности минеральной ваты.

Следовательно, при решении задачи необходимо учитывать не только $M_к$, но и модуль вязкости $M_в$, в который более точно характеризует вязкость расплава. При расчете $M_в$ находят молекулярные количества всех оксидов, для чего количество каждого из них (% по массе) делят на молекулярную массу этого оксида. Затем $M_в$ вычисляют по формуле

$$M_в = \frac{M_{SiO_2} + 2M_{Al_2O_3}}{2M_{Fe_2O_3} + M_{FeO} + M_{CaO} + M_{MgO} + M_{K_2O} + M_{Na_2O}}. \quad (7.4)$$

При ваграночном способе производства минеральной ваты без подогрева воздуха верхний предел $M_в$ (критический), при котором сохраняется достаточная производительность плавильного агрегата, не должен превышать 1,2. При получении расплава в ванных печах предельное значение $M_в$ должно составлять 1,4.

Решая задачу практически, рассчитывают серию химических составов с различными значениями $M_в$, начиная от критического для данного теплового агрегата (1,2 или 1,4) и ниже, и устанавливают значение $M_в$, обеспечивающее необходимый показатель pH. Значения pH рассчитывают по эмпирическим уравнениям, имеющимся в справочной литературе.

Печи для получения силикатного расплава различают по принципу сжигания топлива, зависящему от его вида.

Для получения силикатных расплавов в минераловатном производстве применяют различные типы плавильных печей: шахтные (вагранки), ванные, шахтно-ванные, электродуговые, шлакоприемники. За последнее десятилетие плавильные печи подверглись существенному усовершенствованию и каждый из перечисленных выше типов имеет разновидности.

Выбор типа печи зависит в основном от вида сырья и наличия в данном регионе видов топлива или электроэнергии. В табл. 7.2 приведено сравнение основных типов плавильных печей по их тепловой эффективности.

Таблица 7.2. Тепловая эффективность печей

Тип печи	Удельные затраты теплоты на 1 кг расплава, кДж	КПД, %
Ванная	2603 ... 4993	15 ... 35
Электродуговая	599 ... 700	60 ... 70
Шлакоприемная	298 ... 700	2 ... 5
Коксовая вагранка	1500 ... 3010	20 ... 30

Сравнительные данные показывают, что электродуговая печь — наиболее эффективный плавильный агрегат. Однако ее применение связано с большим расходом электроэнергии.

Вагранки — одни из первых и наиболее распространенных плавильных агрегатов. Вагранки представляют собой шахтные печи непрерывного действия, теплообмен в которых осуществляется по принципу противотока (рис. 7.7). Сырье, загружаемое в верхнюю часть вагранки, опускается вниз, превращаясь в расплав в нижней ее части, а образовавшиеся продукты горения поднимаются снизу вверх, отдавая теплоту расплавляемому материалу.

Вагранка состоит из двух частей: горновой и шахты. В нижней горновой части вагранки происходят горение топлива и плавление сырья. Силикатные расплавы разъедают огнеупорную футеровку, вследствие чего нижнюю часть печи (горновую) делают из металла в виде цилиндра с двумя стенками, между которыми циркулирует вода, предохраняющая корпус вагранки от перегрева. Такая конструкция горновой части получила название ватержакета. В результате водоохлаждения на внутренней поверхности ватержакета из расплава образуется застывший слой — гарнисаж, который предохраняет металл от разъедания расплавом. Температура воды, выходящей из ватержакета, не должна превышать 90°С. Выше ватержакета металлический кожух вагранки защищен огнеупорной футеровкой. Низ горновой части закрывается двухсекционным днищем, подвешенным на шарнирах.

В горновой части имеются фурмы — отверстия для подачи воздуха на горение топлива, которые соединены кольцевой трубой-коллектором. Через коллектор воздух поступает по всему периметру вагранки.

Основными конструктивными параметрами вагранки являются: внутренний диаметр в сечении фурм, рабочая высота шахты, число фурм и объем горна. Промышленные вагранки имеют следующий диаметр: 1000, 1250 и 1400 мм. Отношение рабочей высоты (от оси первого ряда фурм до загрузочного окна) к диаметру находится в пределах 3...5. Число симметрично расположенных по окружности вагранки фурм зависит от размера вагранки и количества подаваемого на горение воздуха.

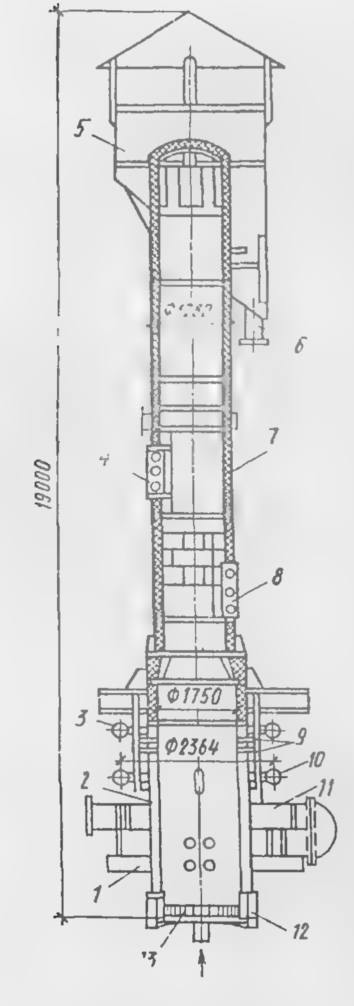


Рис. 7.7. Вагранка ватержакетная:

1 — фурмы; *2* — ватержакет; *3* — труба для отвода воды; *4* — загрузочное окно; *5* — искрогаситель; *6* — патрубок для удаления уноса; *7* — шахта; *8* — люк для осмотра и выполнения ремонтных работ; *9* — компенсаторы; *10* — труба для подвода воды; *11* — воздушный коллектор; *12* — летка; *13* — днище (под)

Для повышения производительности вагранки диаметром более 1000 мм применяют двухрядное расположение фурм, по 8...16 в каждом ряду

Нижнюю часть вагранки от оси нижнего ряда фурм до днища называют горном. В нем накапливается образовавшийся расплав и происходит его гомогенизация по составу и температуре. Чем больше горн, тем дольше расплав в нем находится до выпуска из вагранки и тем лучше условия для гомогенизации расплава. Однако в этой зоне расплав остывает, так как кокс здесь не горит из-за отсутствия кислорода. Поэтому с целью недопущения повышения вязкости расплава высоту горна ограничивают; она колеблется от 600 до 750 мм.

Образовавшийся расплав из горна вытекает через летку и по лотку поступает к узлу волокнообразования. Загрузка сырья и топлива производится через загрузочное окно (люк), расположенное в верхней части вагранки. Ниже загрузочного люка крепится водоохлаждаемый распределитель шихты, с помощью которого шихта равномерно распределяется по сечению вагранки.

Сверху к шахте крепится искрогаситель, представляющий собой металлический кожух с колпаком и скошенным днищем, в нижней части которого имеется патрубок для удаления осевших твердых частиц.

Загрузку сырья осуществляют различными механизмами: скиповыми подъемниками, ленточными питателями, кюбелями, вводимыми непосредственно в шахту печи. Институтом «ВНИИНИИТеплопроект» разработан механизм загрузки шихты, представляющий собой систему из двух конусов. Его применение не требует наличия распределительного устройства. В качестве дозирующих устройств применяют весовые дозаторы типа НВДИ-425.

Работа вагранки определяется процессом горения топлива и передачей теплоты горячими продуктами горения расплавляемому сырью. Зона горения топлива (кокса) находится над фурмами. Процесс горения является химической реакцией соединения углерода кокса с кислородом воздуха. Горение может быть полным с образованием диоксида углерода CO_2:

$$C + O_2 = CO_2 + 398\,000 \text{ кДж/(кмоль)} \qquad (7.5)$$

или неполным с образованием оксида углерода CO:

$$C + 0{,}5O_2 = CO + 116\,500 \text{ кДж/(кмоль)}. \qquad (7.6)$$

В свою очередь, CO может взаимодействовать с кислородом воздуха и сгорать в CO_2:

$$CO + 0{,}5O_2 = CO_2 + 283\,000 \text{ кДж/(кмоль)}. \qquad (7.7)$$

По мере горения кокса в дутьевом воздухе уменьшается O_2 и увеличивается количество CO_2 и CO, одновременно растет температура. На некоторой высоте температура достигает максимального значения (около 1600°С). Эта высота примерно соответствует максимальному содержанию CO_2. Реакция горения прекращается после израсходования всего кислорода воздуха на окисление углерода кокса. Это происходит несколько выше верхней части зоны горения. Выше зоны горения при соприкосновении продуктов горения с раскаленным коксом CO_2 может восстанавливаться в CO из-за недостатка кислорода:

$$CO_2 + C = 2CO - 166\,000 \text{ кДж/(кмоль)}. \qquad (7.8)$$

Как видим, реакция восстановления идет с существенной потерей теплоты; она прекращается в зоне температур 1000 ... 1100°С. Чем выше содержание CO в отходящих газах, тем больше потери теплоты от химической неполноты сгорания топлива, тем ниже КПД вагранки. Это обстоятельство лишний раз подчеркивает необходимость создания избытка воздуха на горение. Однако слишком большой его избыток также приводит к снижению температуры в зоне горения. Борьбу с этим явлением ведут путем подогрева воздуха до 400 ... 500°С перед его подачей в вагранку.

В соответствии с физическими и химическими процессами, происходящими в вагранке, в ней можно выделить пять зон по высоте сверху вниз. Деление на зоны условное, между ними нет четкого разграничивания; размеры зон зависят в первую очередь от свойств расплавляемого сырья (рис. 7.8).

I зона — зона подогрева расположена в верхней части столба шихты. Здесь из материала удаляется физически и химически свя-

заниая вода, т. е. происходит дегидрация сырья. По мере опускания сырья в область температур выше 600°С разлагаются карбонаты магния, а выше 800°С — карбонаты кальция, т. е. происходит декарбонизация сырья. В нижней части зона подогрева переходит в зону плавления, ниже которой при правильном протекании процесса не должно быть сырьевых материалов в твердом состоянии.

II зона — зона плавления расположена над холостой коксовой калошей, которую загружают в вагранку при ее розжиге и располагают на поде вагранки. Холостая калоша служит для поддержания лежащего выше столбика шихты, дополнительного нагрева (перегрева) образующегося расплава, равномерного распределения раскаленных продуктов горения по сечению вагранки и дренажа расплава в горн вагранки. В зоне плавления при температуре 1500 ... 1600°С сырье из твердого состояния переходит в жидкое и, стекая по кускам раскаленного кокса, попадает в горн.

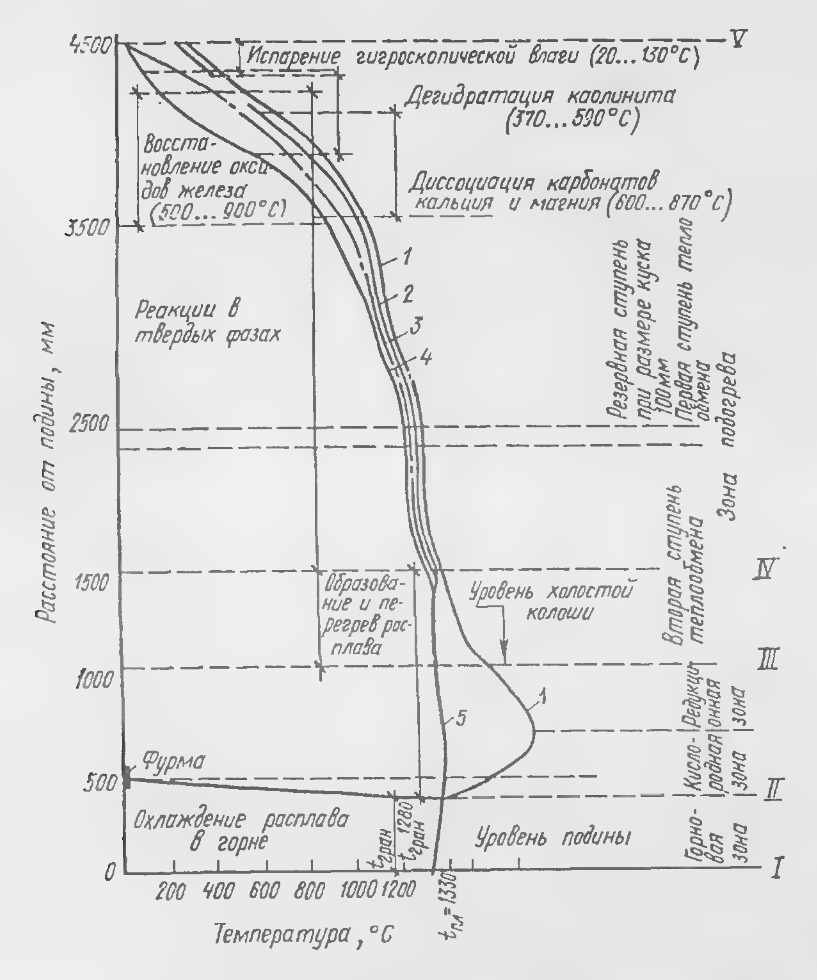


Рис. 7.8. Схема распределения зон физических, физико-химических и химических процессов в шихте при плавлении карбонатной породы в вагранке:

I — уровень лещади; *II* — ось фурм; *III* — средний уровень верха холостой колоши; *IV* — уровень начала плавления легкоплавкого сырья и растворения тугоплавких компонентов; *V* — уровень загрузочного окна или верха столба шихты, *1* — температура газов; *2* — температура куска шихты средняя по массе; *3* — то же, на поверхности куска шихты; *4* — то же, в середине куска шихты; *5* — температура расплавления шихты

Компоненты сырьевой смеси плавятся неодновременно: легкоплавкие плавятся раньше, тугоплавкие — позже. Тугоплавкие компоненты растворяются в образованном легкоплавкими компонентами расплаве. Скорость растворения по закону действующих масс (закон Рауля) зависит от концентрации реагирующих веществ в обеих фазах. На скорость растворения оказывает влияние вязкость расплава; с ее уменьшением скорость растворения возрастает. Для нормального протекания плавления в вагранке необходимо соблюдать определенное соотношение между объемами туго- и легкоплавкого сырья. При избытке тугоплавкого компонента наблюдается его неполное растворение в расплаве легкоплавкого компонента вследствие ограниченного времени пребывания сырья в зоне плавления. Ускорению плавления способствует увеличение поверхности тугоплавкого компонента, что достигается уменьшением размеров его кусков по сравнению с кусками легкоплавкого компонента.

III зона — редукционная (восстановительная), расположена в верхней части холостой коксовой калоши, выше условной линии, где содержание кислорода в среде практически равно нулю, т. е. до верха холостой калоши. В этой зоне CO_2 восстанавливается до CO, температура продуктов горения падает тем больше, чем больше количество CO_2 перейдет в CO.

Восстановительный процесс, его интенсивность зависит от реакционной способности топлива и размеров его кусков (удельной поверхности).

Под реакционной способностью топлива R понимают его способность восстанавливать образовавшуюся при сгорании CO_2 в CO. Величину R, %, определяют по формуле

$$R = \frac{CO}{CO + 2CO_2} 100. \quad (7.9)$$

Для снижения восстановительного процесса следует применять крупные куски кокса с реакционной способностью 15 ... 25%.

IV зона — кислородная, расположена над фурменным поясом от оси фурм до условной границы, где содержание свободного кислорода равно нулю. В этой зоне топливо интенсивно сгорает. В конце зоны температура достигает максимальных значений. Размеры кислородной зоны зависят от качества топлива, величины его кусков и температуры среды. Чем выше реакционная способность топлива, чем меньше размер кусков, тем быстрее идет горение и тем меньше кислородная зона.

V зона — гомогенизации расплава, расположена ниже фурменного пояса до пода вагранки. В верхней части зоны в связи с наличием кислорода, поступающего с воздухом из фурм, происходит интенсивное горение кокса в холостой калоше. Ниже окислительная способность среды теряется и на уровне подины она равна нулю. В этой зоне сохраняется высокая температура среды, так как теплота расходуется только на покрытие тепловых потерь через боковые стенки и подину вагранки. Выгорающий в холостой калоше кокс непрерывно пополняется коксом, загружаемым совместно с сырьевыми материалами. Поэтому уровень холостой калоши сохраняется примерно постоянным.

Требования к сырью и топливу диктуются обеспечением необходимого аэродинамического сопротивления столбом шихты, а также интенсификацией процесса растворения тугоплавких компонентов в расплаве легкоплавких веществ. С этих позиций не допускается применение мелких фракций сырья (менее 20 мм), которые резко увеличивают аэродинамическое сопротивление столба шихты. Размеры кусков шлака и легкоплавких горных пород должны находиться в пределах 40 ... 100 мм. Тугоплавкие породы, такие, как доломит, известняк, следует применять в виде более мелких фракций (20 ... 40 мм). Сохранение исходной гранулометрии шихты может быть обеспечено только в случае достаточной прочности кусков сырья, которая, как показывает практика, должна быть не менее 2,0 МПа.

К топливу для вагранки помимо гранулометрии и малой реакционной способности предъявляются еще и такие требования: достаточная прочность не только в холодном, но и в нагретом состоянии; малая зольность (8 ... 9%), так как зола переходит в расплав и влияет на его состав; содержание серы в топливе не должно превышать 1,5%. Этим требованиям отвечает каменноугольный кокс, который по назначению подразделяют на литейный (КЛ) и доменный (КД). Доменный кокс дешевле, однако литейный кокс характеризуется значительно меньшей реакционной способностью, в результате чего в вагранке развивается более высокая температура горения и более устойчиво и интенсивно протекают все процессы.

Наиболее предпочтителен крупный кокс с размером кусков 80 ... 120 мм.

Производительность вагранок зависит от многих факторов и может колебаться в широких пределах. Производительность вагранки характеризует удельный съем расплава — количество получаемого расплава с 1 м² площади поперечного сечения вагранки в плоскости фурм в единицу времени. Этот удельный съем в силу различных причин колеблется от 1200 до 3000 кг/(м²·ч).

На производительность вагранки влияют вид сырья, его гранулометрический состав, равномерность загрузки шихты, вид и расход кокса, интенсивность и температура дутья.

При плавлении шлака съем расплава больше, чем при плавлении горных пород. Так как шлаки уже являются продуктом плавления, из этого следует, что процессы диссоциации, декарбонизации, требующие дополнительных затрат топлива, в них уже прошли и, кроме того, в них уже разрушена кристаллическая структура и они в основном содержат стеклофазу. Все это облегчает процесс плавления такого сырья и снижает энергозатраты на его проведение.

Однако качество волокна, получаемого из шлаков, хуже, чем из горных пород, так как в нем содержится достаточно большое количество нежелательных примесей.

Определенная узкофракционная гранулометрия сырья и кокса, равномерная загрузка шихты по сечению вагранки создают необходимые аэродинамические условия для нормальной работы печи и обеспечивают устойчивость и спокойный ход плавления.

Весьма эффективным фактором, увеличивающим производительность вагранки, является повышение интенсивности дутья, так как с увеличением количества воздуха, подаваемого на горение, ускоряется горение кокса. Однако повышать интенсивность дутья можно до определенного предела, сверх которого снижается температура расплава, увеличивается его вязкость и производительность резко уменьшается. Существует оптимум подачи воздуха, обеспечивающий наилучшие результаты плавления шихты. Этот оптимум неоднозначен, он связан с расходом кокса, с химическим составом и гранулометрией шихты, определяющей аэродинамические условия работы вагранки, и некоторыми другими факторами.

Увеличение расхода кокса повышает температуру расплава. Но при этом необходимо достичь требуемого оптимального соотношения между количеством кокса и воздухом. Кроме того, увеличение расхода топлива не является эффективным и экономически оправданным приемом. Наоборот, современные условия требуют создания малоэнергоемких технологий во всех отраслях техники.

Практикой установлено, что на плавление шихты, характеризующейся $M_к = 1{,}2 \ldots 1{,}3$, расход кокса должен находиться в пределах 17 ... 20% от массы шихты. По данным исследований, проведенных в ВНИИПИТеплопроекте. Р. В. Вагаповой, оптимальный расход воздуха для обеспечения наибольшей производительности вагранки должен составлять 45 ... 50 м³/(м²·мин) при расходе кокса 17 ... 18% от массы шихты и 55 ... 60 м³(м²·мин) при расходе кокса 19 ... 21%.

Повышение производительности и КПД вагранок, улучшение качества получаемой минеральной ваты находятся в центре внимания научно-исследовательских и производственных коллективов, работающих в области минераловатного производства. Необходимость модернизации вагранок диктуется тем, что основная масса минераловатной продукции выпускается заводами, на которых в качестве плавильных агрегатов используют вагранки. Широкое

применение вагранок объясняется их высокой производительностью, простотой обслуживания, малыми габаритами по сравнению с другими плавильными агрегатами.

К недостаткам вагранок относят: низкий коэффициент полезного использования теплоты, высокий удельный расход дефицитного и дорогостоящего топлива, плохое качество расплава, выражающееся в изменчивости его химического состава и вязкости, в результате чего нарушается стабильность истечения расплава, а получаемая минеральная вата характеризуется непостоянством свойств; неудовлетворительные санитарно-гигиенические условия эксплуатации, обусловленные применением кокса.

Мероприятия по улучшению работы вагранок сводятся к устройству копильника расплава; изменению формы ватержакета на конусную или овальную; применению испарительного охлаждения вагранки; оборудованию вагранки более мощными воздуходувными установками; применению дутья с предварительным подогревом воздуха, оборудованию ваграночного комплекса автоматизированной системой контроля и управления процессами.

Устройство копильника расплава весьма эффективно влияет на повышение качества минеральной ваты и процесс волокнообразования. При его наличии существенно повышается химическая однородность расплава, стабилизируется его вязкость, обеспечивается равномерность истечения из вагранки, чем существенно облегчается процесс волокнообразования и повышается качество ваты. Кроме того, в копильнике происходит осаждение металла, восстановившегося из оксидов железа.

Копильник расплава может быть выполнен в виде вынесенной за пределы шахты обогреваемой емкости, соединенной с горном вагранки через летки, или им может служить нижняя часть горна. В последнем случае нижний ряд фурменных отверстий может быть заделан, а футеровка днища выполнена с обратным уклоном к летке.

Изменение формы ватержакета на конусную или овальную позволяет увеличить площадь зоны плавления и за счет этого повысить производительность вагранки.

Испарительное охлаждение позволяет в 12 ... 15 раз сократить расход воды на охлаждение корпуса вагранки. Для испарительного охлаждения применяют химически очищенную воду. Система такого охлаждения работает следующим образом. Из верхней части ватержакета пароводяная смесь с температурой 95 ... 100°C поступает в бак-сепаратор, где пар отделяется от воды. Насыщенный пар в баке охлаждается и конденсируется, вода из бака-сепаратора возвращается обратно в ватержакет в нижнюю его часть, потери воды автоматически восполняются. Таким образом, ватержакет постоянно заполнен кипящей водой и находится под напором столба жидкости, равным разности высот ватержакета и бака-испарителя. Испарительная система, при которой разность температур входящей и выходящей воды незначительна, позволяет увеличить срок службы ватержакета, так как при этом уменьшаются температурные напряжения корпуса. При постоянном уровне воды в расходном баке эта система безопасна, так как сообщается с атмосферой.

Выше было показано, что интенсификация дутья повышает производительность вагранок. Интенсификацию дутья осуществляют путем замены вентиляторов типа ВВД воздуходувками, которые развивают давление воздуха, в 1,4 ... 3,3 раза больше, чем вентиляторы.

Наибольший эффект достигается при интенсивном горячем дутье, так как в этом случае в зону горения вносится дополнительная теплота. Применение горячего дутья особенно важно при плавлении тугоплавких материалов (горных пород), которые во все возрастающем количестве используют для производства минеральной ваты высшей категории качества.

Горные породы типа базальта, диабаза и других при плавании образуют расплав повышенной вязкости, что затрудняет его протекание через холостую калошу кокса. При этом нарушается ваграночный процесс. Повышение температуры на 50 ... 100°C, которое достигается с помощью горячего дутья и его интенсификации, исключает этот недостаток, снижая вязкость расплава до оптимальных значений. Нагрев воздуха можно осуществлять, используя теплоту отходящих из вагранки дымовых газов. Для этого воздухонагреватель устанавливают на тракте уходящих газов, а перед ним необходимо дожигание CO. Такая система подогрева воздуха сложна и имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что теплопередающая поверхность засоряется ваграночной пылью и требует систематической очистки. Поэтому снабжение вагранки горячим дутьем осуществляют чаще путем установки вблизи вагранки специального отапливаемого воздухонагревателя, работающего на газообразном или жидком топливе.

Четкий контроль и автоматическое регулирование параметров процесса плавления способствуют как повышению производительности вагранки, так и стабилизации свойств расплава и, следовательно, повышению качества получаемой ваты. На рис. 7.9 приведена схема автоматизированной вагранки с испарительной системой охлаждения и рекуператором для использования отходящих газов.

Рекуператор вагранки состоит из камеры дожигания CO, теплообменника и головки рекуператора. В камере дожигания CO установлены горелочные устройства, с помощью которых дожигают оксид углерода и стабилизируют температуры в камере в случае колебания содержания CO в ваграночных газах. В теплообменник горячие газы поступают с температурой 1100°C. Нагретый до 450 ... 550°C воздух направляется к фурмам вагранки, а ваграночные газы — в систему очистки.

Экономия дефицитного топлива, которым является кокс, — одна из основных задач при получении силикатных расплавов в вагран-

ках. Помимо применения горячего дутья экономия кокса достигается утилизацией теплоты отходящих газов путем увеличения столба шихты. При этом процессы теплообмена между шихтой и отходящими газами протекают более полно и, следовательно, КПД вагранки возрастает. Однако при высоком столбе шихты необходимо обеспечить хорошую газопроницаемость путем подбора

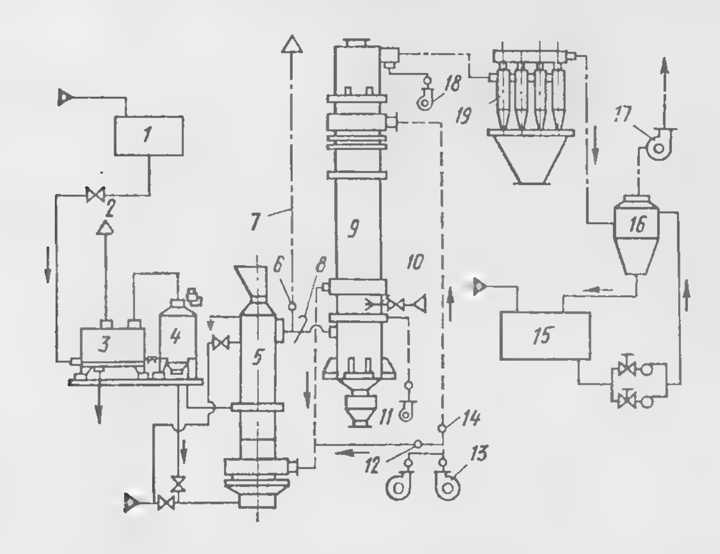


Рис. 7.9. Схема комплекса автоматизированной вагранки СМТ-155:

1 — водоумягчительная установка; 2 — вентиль типа СВМ; 3 — подпиточный бак; 4 — бак-сепаратор; 5 — вагранка; 6 — дроссельный клапан; 7 — труба аварийного сброса; 8 — шибер; 9 — рекуператор; 10 — газовая горелка; 11 — вентилятор; 12, 14 — дроссельные клапаны; 13 — нагнетатель 200 III-1 м; 15 — система отстойно-очистных сооружений; 16 — пенный газоочиститель ПГС-50; 17 — дымосос Д-13,5; 18 — вентилятор; 19 — циклоны ЦН-15

необходимой гранулометрии шихты, а также за счет подбора размера и числа фурм.

С целью экономии кокса осуществляют и более радикальные мероприятия — заменяют часть кокса или весь кокс газообразным топливом. Для этого применяют вагранки соответствующих конструкций.

Коксогазовая вагранка позволяет экономить 20...40% дефицитного кокса за счет замены его газообразным топливом. Для этого вагранку оборудуют газовыми горелками, расположенными несколько выше фурменного пояса. Однако в коксогазовой вагранке сохраняются все недостатки ваграночного процесса и существенно усложняется обслуживание печи.

Газовая вагранка позволяет полностью заменить кокс газообразным топливом, устранить все основные недостатки, связанные с его сжиганием, упростить процесс плавления и повысить культуру производства. При этом расход топлива может быть существенно снижен. Наличие копильника расплава (рис. 7.10) позволяет достичь практически полной гомогенизации расплава и, следовательно, стабилизировать его вязкость, что существенно облегчает процесс волокнообразования и повышает качество получаемой ваты. Существенные трудности при применении газо-

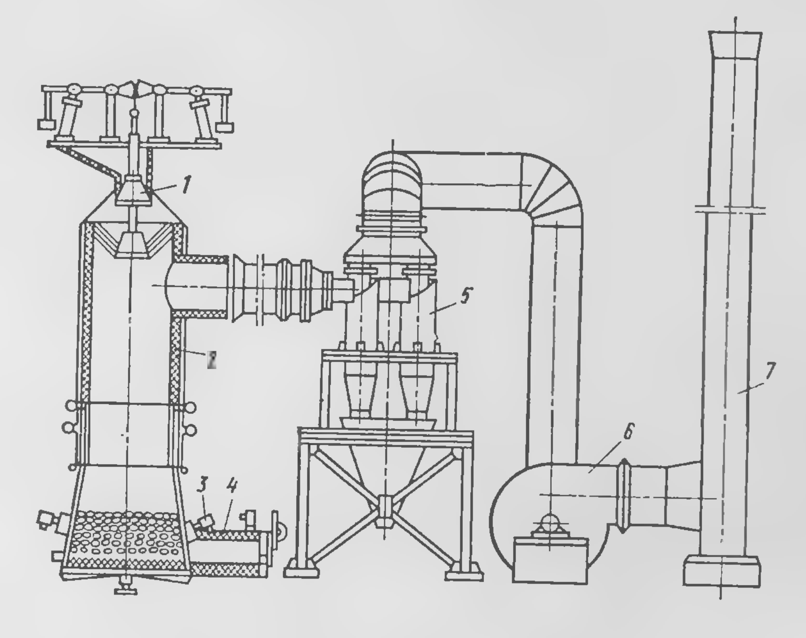


Рис. 7.10. Схема газовой вагранки диаметром 1200 мм с десятью горелками:

1 — загрузочное устройство; 2 — футерованная шахта; 3 — горелки; 4 — копильник; 5 — циклоны; 6 — вентилятор; 7 — труба

вой вагранки возникают в связи с высокой агрессивностью силикатных расплавов. Огнеупорный балласт, который служит опорой для столба шихты и дренажем для образовавшегося расплава, интенсивно разъедается последним, из-за чего изменяется состав расплава. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе огнеупорного балласта.

Ванные печи широко применяют при стекловарении. Для получения силикатных расплавов в минераловатном производстве печи этого типа меньших размеров применяют достаточно широко. Для этой цели пригодны все типы ванных печей: с подковообразным, продольным и поперечным направлениями пламени. По способу использования теплоты отходящих газов эти печи могут быть регенеративными и рекуперативными. Рекуперативные печи наиболее экономичны, но требуют дорогостоящих высо-

коогнеупорных материалов. Наибольшее распространение получили регенеративные печи (рис. 7.11) с подковообразным направлением пламени. Плавление шихты осуществляется в бассейне. Выработочная часть — фидер — для поддержания необходимой температуры расплава оборудована дополнительной горелкой.

В ванной печи температура в зависимости от вида сырья может изменяться от 1100 до 1600 °С. Для получения расплава применяют сырье в измельченном виде с размером частиц 1...2 мм. С одной стороны, это позволяет ускорить процесс плавления и повысить степень гомогенизации расплава, а с другой — на измельчение сырья и его рассев затрачивается дополнительная энергия.

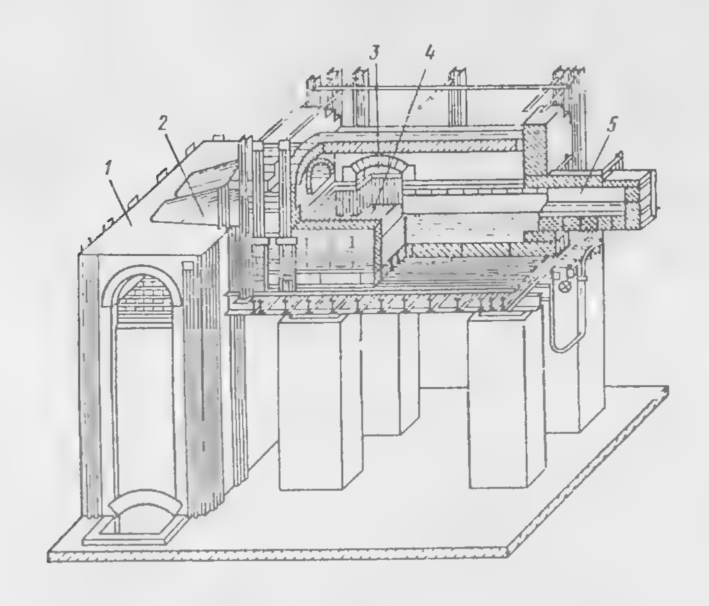


Рис. 7.11. Ванная печь:

1 — регенераторы; *2* — горелка; *3* — загрузочное окно; *4* — бассейн; *5* — фидер

К достоинствам ваных печей следует отнести получение гомогенных расплавов заданного химического состава, использование дешевых видов топлива, отсутствие требований к прочности сырья, существенное снижение потерь расплава.

Основными недостатками этих печей являются: относительно низкий удельный съем расплава от 25 до 50 кг/(м^2·ч), что для достижения сравнимой с вагранкой производительностью требует 4...5-кратного увеличения производственной площади; повышенный удельный расход топлива. Однако следует отметить, что увеличение удельного расхода топлива практически не сказывается на стоимости минеральной ваты, так как применяются дешевые виды топлива и снижается потеря расплава при его переработке в волокно.

Есть весьма положительный опыт применения газоэлектрических печей (цех минеральной ваты Норильского горно-металлургического комбината). Такая ванная печь имеет дополнительный электрический обогрев, осуществляемый погруженными в расплав электродами. Это создает благоприятные условия для направленного регулирования движения расплава и выравнивания его состава. При этом ускоряется процесс плавления, увеличивается удельный съем расплава и существенно снижается расход топлива.

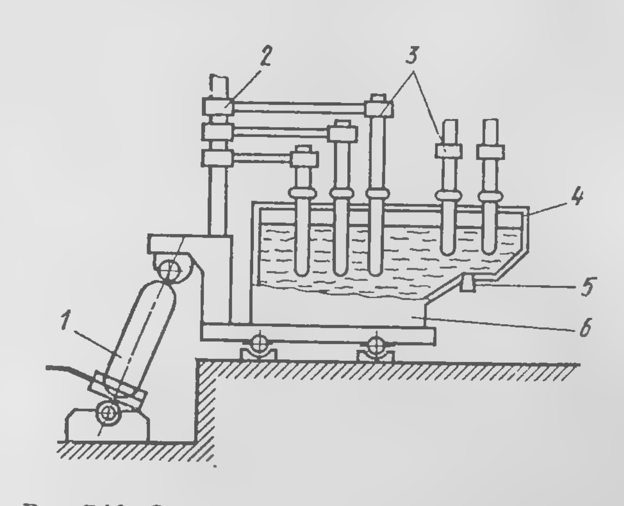


Рис. 7.12. Схема электродуговой печи СКБ-6098:

1 — гидропривод наклона печи; *2* — механизм подъема электродов; *3* — графитированные электроды; *4* — водоохлаждаемый свод; *5* — выпускное отверстие; *6* — водоохлаждаемый цилиндрический секционный корпус

С учетом преимуществ и недостатков ванных печей можно сделать вывод, что их применение в минераловатном производстве, несмотря на высокие капиталовложения, весьма рационально, так как позволяет получать готовый продукт более высокого качества, а также исключает необходимость использования дефицитного и дорогого топлива — кокса.

Электродуговые печи наиболее широко используют при производстве высокотемпературостойкой и огнеупорной ваты. Однако возможно их применение и для производства рядовой минеральной ваты.

Электродуговая печь представляет собой металлическую водоохлаждаемую ванну (рис. 7.12), выполненную в виде котла диаметром 2,5...3,0 м. Металл защищается от расплава слоем гарнисажа, который образуется на внутренней поверхности котла. Плавление сырья осуществляется с помощью трех графитированных электродов. Шихту загружают сверху с помощью шнекового или иного питателя. Образовавшийся расплав выпускают через небольшой фидер, монтируемый сбоку печи несколько выше ее пода.

Изменяя электрический режим, можно регулировать теплотехнические параметры плавления в соответствии с технологическими требованиями.

Печи для производства минеральной ваты из огненно-жидких шлаков носят название печи-шлакоприемники (рис. 7.13).

Применение огненно-жидких шлаков позволяет существенно снизить расход теплоты на получение расплава, а также уменьшить капиталовложения на строительство отделения подготовки и хранения сырья. Основным сырьем в данном случае являются доменные огненно-жидкие шлаки, состав которых корректируют вве-

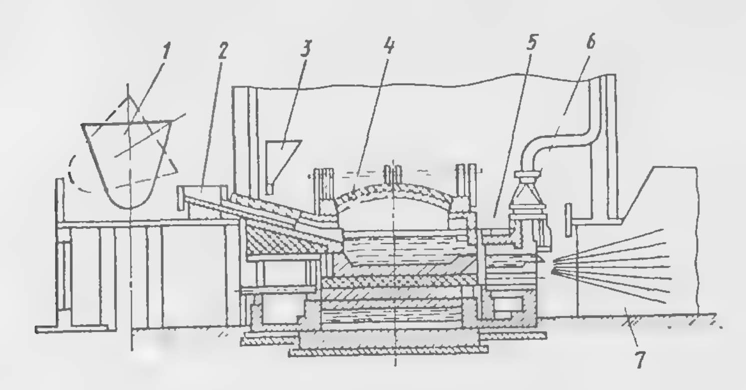


Рис. 7.13. Схема печи-шлакоприемника:

1 — шлаковозный ковш; *2* — приемный лоток; *3* — бункер для добавок; *4* — приемный бассейн; *5* — печь-питатель; *6* — вытяжной зонд; *7* — камера волокноосаждения

дением необходимых добавок. Печь-шлакоприемник обеспечивает гомогенизацию расплава и его подогрев до требуемой температуры. Шлак через летки металлургических печей сливают в шлаковозный ковш, в котором его доставляют к печи. Недостающее количество Al_2O_3—SiO_2 восполняют добавлением соответствующего компонента (горной породы, стеклобоя, песка и др.), который засыпают в ковш до его заливки шлаком или вводят в шлак через загрузочное отверстие в желобе печи во время его подачи в печь.

Корректировка химического состава огненно-жидкого шлака имеет свои трудности, поэтому этот способ получения силикатного расплава для производства минеральной ваты не получил пока широкого применения. Поиски наиболее эффективного теплового агрегата для получения силикатных расплавов ведутся давно. Предложены и испытываются различные плавильные агрегаты: циклонные печи, газовые печи с погруженной в расплав горелкой, печи конвертерного типа, дуплекс-плавильные агрегаты, состоящие из вагранки и ванной печи, и др. Все они имеют свои преимущества и недостатки. По количеству расплава, получаемого при затрате 1 кг условного топлива, плавильные агрегаты можно расположить в такой последовательности: шлакоприемные печи (9,6...16,6 кг); электродуговые (6,7...12,7 кг); вагранки с автоматическим управлением (6 кг); газовые вагранки (4,[illegible]...4,23 кг); коксогазовые вагранки (4,1...4,55 кг); дуплекс-плавильная установка (4,43 кг); ванные печи (2,3...3,15 кг); газовый плавильный агрегат с погруженной горелкой (2,21...2,84 кг).

Выбор плавильного агрегата зависит от вида сырья, требуемой производительности, наличия электроэнергии и вида топлива.

Способы переработки расплава в волокно основаны на расщеплении струи расплава, вытекающей из печи, на тончайшие струи и их вытягивании в волокна.

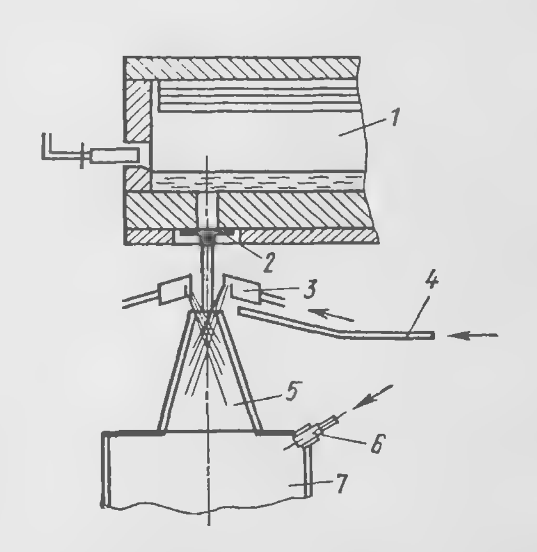


Рис. 7.14. Узел раздува расплава при фильерном вертикально-дутьевом способе получения волокна:

1 — фидер; *2* — фильерный питатель; *3* — дутьевое устройство; *4* — устройство для подачи обеспыливающего вещества; *5* — диффузор; *6* — форсунка для подачи связующего вещества; *7* — шахта камеры волокноосаждения

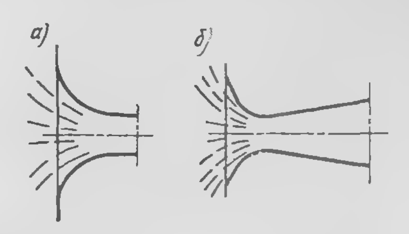


Рис. 7.15. Виды сопл:

а — простое сопло; *б* — сопло Лаваля

В настоящее время известно несколько разновидностей способов переработки силикатных расплавов в волокно. По принципу воздействия энергоносителя на струю расплава, истекающего из плавильного агрегата, их можно разделить на три основных способа: дутьевой, центробежный и комбинированный.

Дутьевой способ основан на воздействии энергоносителя (пара, горячих газов), движущегося с большой скоростью (400... 800 м/с), на струю (струи) расплава. Энергоноситель расщепляет струю расплава и вытягивает образовавшиеся элементы в волокна.

По направлению струи энергоносителя дутьевой способ подразделяют на горизонтальный и вертикальный. При горизонтальном способе струя энергоносителя направлена на струю расплава под углом 15...20° к горизонту, а при вертикальном — под углом 10...11° к вертикали, с двух сторон струи расплава (рис. 7.14).

Дутьевой способ основан на термодинамических закономерностях процесса истечения водяного пара и газов из сопл, когда их кинетическая энергия увеличивается за счет уменьшения потенциальной или тепловой энергии.

Сопло представляет собой узкий канал в дутьевой головке. Входное сужающееся отверстие во всяком сопле должно иметь плавно округленные кромки для превращения большей части потенциальной энергии в кинетическую и получения вследствие этого как можно большей скорости истечения энергоносителя. Существует два типа сопл: простое суживающееся и сопло Н. Лаваля (рис. 7.15, *а, б*). Сопло Лаваля имеет входную короткую суживающуюся и длинную расширяющуюся выходную части. В таком сопле потенциальная энергия пара или газа более полно преобразуется в кинетическую. В адибатных условиях скорость истечения энергоносителя, м/с, можно рассчитать по формуле

$$V = 44{,}8\varphi \sqrt{i_1 - i_2}, \qquad (7.10)$$

где φ — коэффициент расхода, равный для простого сопла 0,62, для сопла Лаваля — 0,95; i_1 и i_2 — соответственно начальная и конечная энтальпии пара или газа, кДж/кг.

При истечении пара или газа в среду с резко пониженным давлением устанавливается критическая скорость, которую рассчитывают по формуле

$$V_{кр} = \sqrt{2g \frac{K}{K+1} RT_1}, \qquad (7.11)$$

где K — показатель адиабаты, равный для идеального газа 1,4, для перегретого — 1,3 и для насыщенного пара — 1,135; R — газовая постоянная, равная для пара 471, для воздуха — 292,7 кДж/(кг·°С); T_1 — начальная температура.

Подставляя значения K, R и T_1 в формулу, получаем значения $V_{кр}$ для различных видов теплоносителя. Расчеты показывают, что применение перегретого пара наиболее эффективно.

По принципу воздействия на струю расплава дутьевые головки можно разделить на два типа — ударного и эжекционного действия (рис. 7.16, *а, б*). Эжекционные дутьевые головки работают по принципу всасывания струи расплава и расчленения ее на волокна внутри головки. Вакуум в головке образуется за счет очень высокой скорости движения энергоносителя. Такие головки позволяют получать волокна очень высокого качества толщиной 1...3 мкм. Однако их производительность мала для узлов переработки расплава в минеральную вату (180 ... 200 кг/ч). Поэтому эжекционные сопла применяют главным образом при получении огнеупорных волокон.

Необходимо отметить, что горизонтальный дутьевой способ не обеспечивает получения высококачественной минеральной ваты, так как при его применении образуется много корольков, а волокна имеют большой разброс по диаметру. Это объясняется двумя основными причинами: во-первых, раздувается одна довольно толстая (7...10 мм) струя расплава; во-вторых, под действием гравитации часть элементов струи расплава попадает в периферийную зону струи энергоносителя, где скорость его движения меньше и энергии на вытягивание волокна из элементов струи не хватает. В настоящее время этот способ в чистом виде не применяют.

При вертикальном раздуве с помощью фильер расплав разделяют на более тонкие струи (не более 2 мм), что существенно

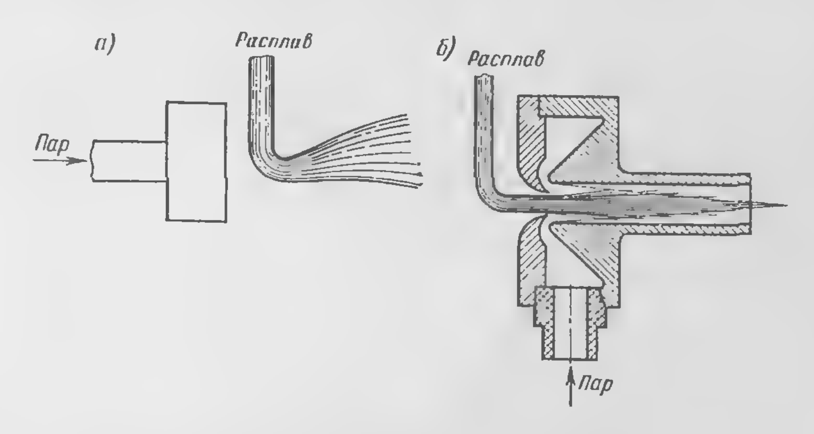


Рис. 7.16. Виды дутьевых головок:
а — ударного действия; *б* — эжекционная

облегчает процесс волокнообразования. Этот способ широко применяют на практике, особенно при получении стеклянной ваты.

Центробежный способ основан на использовании центробежной силы вращающихся элементов центрифуг, на которые подается расплав. При производстве минеральной ваты используют центробежные установки различных конструкций, отличающиеся между собой количеством вращающихся органов, их формой и расположением в пространстве. Центробежные установки могут быть одноступенчатыми, когда расплав обрабатывается на одной центрифуге, и многоступенчатыми, если переработку расплава в волокно осуществляют последовательно на нескольких центрифугах. По форме рабочего органа центрифуги могут быть дисковыми, чашечными и валковыми, а по расположению плоскости вращения — горизонтальными и вертикальными. В одноступенчатой установке используют диск из жаростойкой стали или огнеупора, который вращается вокруг вертикальной оси с

частотой вращения 10 000 мин⁻¹. Расплав, попадая на диск с бортом, распределяется по его поверхности в виде пленки, которая благодаря центробежной силе перемещается к краю диска, сходит с него и под действием поверхностного натяжения распадается на струйки, из которых образуется волокно. Этот способ не получил широкого распространения из-за невысокой производительности, которая составляет не более 400 кг/ч.

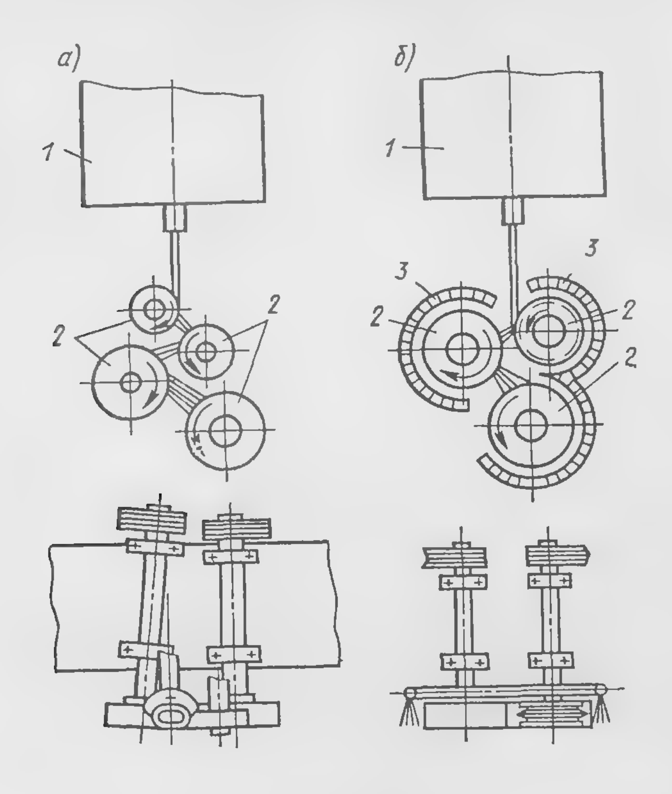


Рис. 7.17. Схемы многовалковых центрифуг:

а — четырехвалковая; *б* — трехвалковая; *1* — вагранка; *2* — вращающиеся валки; *3* — дутьевые устройства

Наибольшее распространение в мировой практике получил центробежно-валковый способ. В этом случае рабочим органом являются последовательно расположенные валки, вращающиеся вокруг горизонтальных осей (рис. 7.17). Рабочей частью валков является боковая поверхность. Расплав с температурой около 1400 °С стекает через лоток на верхний распределительный валок, попадая в строго определенную точку его поверхности, находящуюся под углом 30...40° к горизонтальной плоскости, проходящей через ось валка. Затем расплав последовательно обрабатывается всеми валками, окружная скорость которых увеличивается по мере удаления валков от места поступления расплава. Увеличение окружной скорости валков необходимо в связи с тем, что по мере прохождения через них расплав остывает, его вязкость возрастает и для вытягивания отдельных струек в волокна требуется больше энергии. Повышение окружной скорости осуществляют увеличением диаметра валков. Процесс волокнообразования может идти только в случае прилипания расплава к поверхности валков, которое обеспечивается при нагревании валков до 500...600 °С и увеличивается с повышением их температуры. Важным параметром, влияющим на качество минеральной ваты (на диаметр волокон), является окружная скорость валков (рис. 7.18).

Нормальная работа отечественных многовалковых центрифуг обеспечивается при подаче расплава с температурой 1360...1380 °С в количестве 1700...3500 кг/ч. Промышленные центрифуги имеют следующие параметры: частота вращения — 3000...6000 мин⁻¹, диаметры валков — 150...380 мм, окружные скорости — 24...120 м/с.

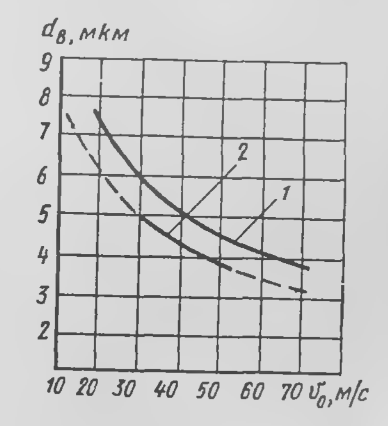


Рис. 7.18. Влияние окружной скорости валка на диаметр волокна:

1 — расчетные данные; *2* — экспериментальные данные

Комбинированные способы основаны на использовании как центробежной силы, так и кинетической энергии пара или газа. В промышленности наиболее широкое применение получили центробежно-дутьевой и центробежно-фильерно-дутьевой способы.

Центробежно-дутьевой способ (ЦДС) предусматривает превращение струи расплава в пленку и струйки с помощью вращающейся чаши и последующее вытягивание струек в волокна под воздействием энергоносителя. Схема рабочего органа центробежно-дутьевой установки приведена на рис. 7.19. Расплав из вагранки по лотку стекает на внутреннюю часть боковой стенки раздаточной чаши, вращающейся с частотой вращения 1000...1200 мин⁻¹, распределяется по ее периметру и срывается с кромок чаши в виде пленок, струек, капель. Последние попадают в поток энергоносителя, и под совместным воздействием центробежной и аэродинамической сил из струек, пленок и капель образуются волокна. Энергоноситель (пар, горячие газы) с большой скоростью истекает из отверстий диаметром 2...4 мм, расположенных на дутьевом кольце на расстоянии 15...20 мм друг от друга. Дутьевое кольцо устанавливается вокруг распределительной чаши в непосредственной близости от ее кромок на расстоянии 5...15 мм.

Центрифуги такой конструкции работают устойчиво при следующих параметрах: температура расплава — 1300...1350 °С, коли-

чество расплава — 1500...2500 кг/ч, давление энергоносителя в дутьевом кольце — 0,4...0,8 МПа.

Центробежно-фильерно-дутьевой способ (ЦФД) основан на диспергировании струи расплава в тонкие струйки, на которые затем воздействует энергоноситель. Схема рабочего органа установки показана на рис. 7.20. Струя расплава через полый шпиндель поступает в чашу *1*, вращающуюся с частотой до 3000 мин$^{-1}$. В нижней рабочей зоне чаша имеет перфорацию (от 2000 до 6000 отверстий), выполненную в несколько рядов. Диаметр отверстий колеблется от 0,2 до 2 мм. Изменение диаметра отверстий позволяет направленно формировать толщину струек расплава,

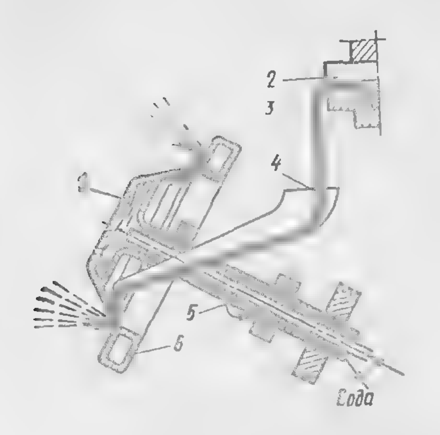


Рис. 7.19. Схема центробежно-дутьевой установки:

1 — раздаточная чаша; *2* — вагранка; *3* — расплав; *4* — направляющий лоток; *5* — приводной вал; *6* — дутьевой коллектор

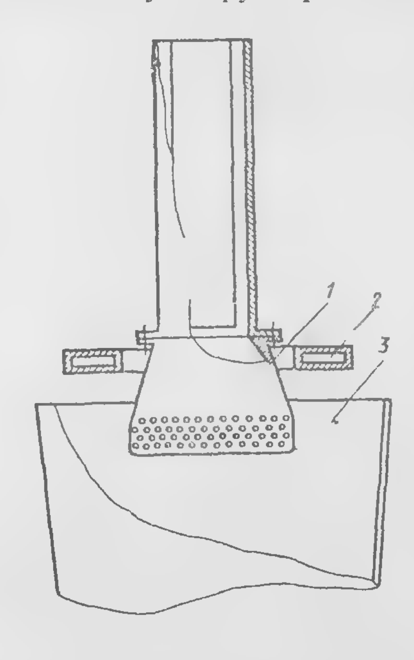


Рис. 7.20. Схема центробежно-фильерно-дутьевой установки

которые выбрасываются из чаши через перфорацию под действием центробежной силы. Чаша окружена кольцевым соплом *2*, из которого со скоростью до 30 м/с и выше истекают горячие газы с температурой 1040...1050 °С. Под совместным воздействием центробежной силы и газового потока струйки расплава вытягиваются в волокна и поступают в камеру волокноосаждения *3*.

Этот способ позволяет получать практически бескорольковую вату с диаметром волокон до 1...2 мкм. Однако производительность установки не превышает 250 кг/ч. Центробежно-фильерно-дутьевой способ применяют главным образом для получения штапельного стеклянного волокна.

В табл. 7.3 приведены основные технико-экономические показатели наиболее распространенных способов получения минеральной ваты.

Таблица 7.3. **Технико-экономические показатели различных способов получения минеральной ваты**

Показатель	Фильерно-дутьевой (вертикальный)	Центробежно-дутьевой	Центробежно-валковый
Средняя плотность ваты, кг/м^3	75	100	75 ... 85
Диаметр волокна (средний), мкм	6,0	6,8	6,5
Содержание корольков, %	2,2	17 ... 19	14
Затраты на получение 1 т волокна:			
энергоноситель — пар, кг	4000	1200 ... 1600	—
электроэнергия, кВт·ч	—	2 ... 4	13 ... 23
производительность (по расплаву), кг/ч	500	1500 ... 2500	2000 ... 3500

7.2. Особенности получения стекловолокна

Особенность технологии стекловолокна (стеклянной ваты) обусловлена химическим составом стекол. Для получения стекловолокна применяют как щелочные, так и бесщелочные боросодержащие составы стекла (табл. 7.4).

Таблица 7.4. **Химические составы стекол**

Составы	Содержание оксидов, % по массе						
	SiO_2	Al_2O_3	B_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O
Щелочные	50 ... 72	1 ... 6	0 ... 3	0,2 ... 1	5 ... 20	2 ... 7	8 ... 20
Бесщелочные	53 ... 60	12 ... 16	5 ... 10	0 ... 0,2	7 ... 23	4 ... 8	0,5 ... 2

Для производства стеклянных волокон (ваты) применяют следующее основное сырье: в качестве кислых оксидов — песок, глинозем, борную кислоту $B(OH)_3$; в качестве щелочных оксидов — соду Na_2CO_3, сульфат натрия Na_2SO_4, поташ K_2CO_3; в качестве щелочно-земельных оксидов — известняк, мел, доломит. Некоторые применяемые сырьевые материалы вносят в шихту два оксида, например полевой шпат (SiO_2, Al_2O_3), бура (Na_2O, B_2O_3).

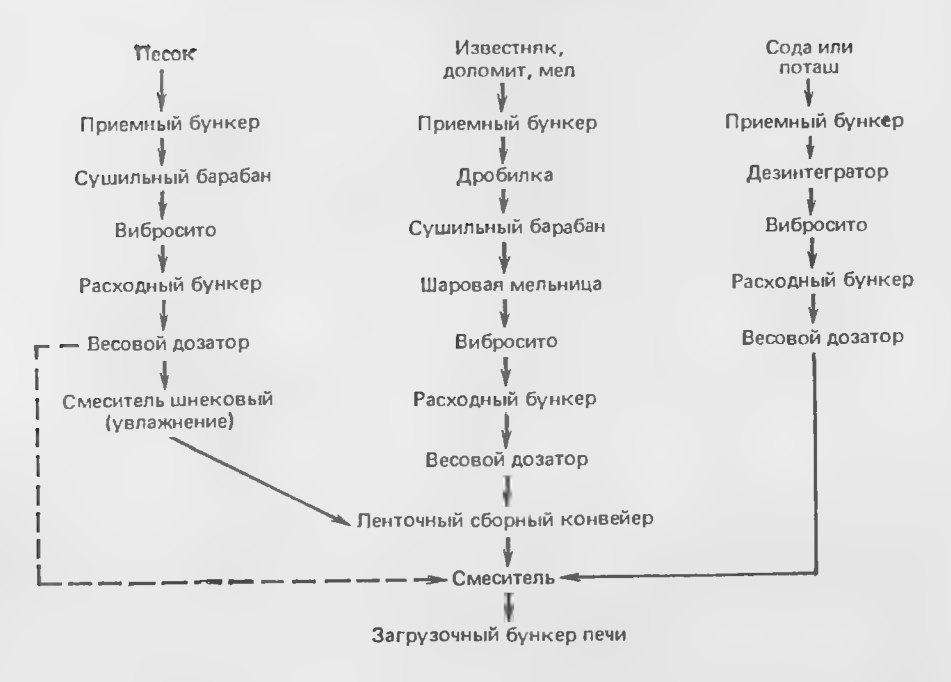
Следует отметить, что прочность, химическая стойкость и температуростойкость выше у волокон, изготовленных из боросодержащих стекол. Но бораты дороги и дефицитны, поэтому теплоизоляционное волокно производят из щелочных составов.

Подготовку сырьевых материалов и приготовление шихты осуществляют согласно технологической схеме, приведенной ниже.

Сушку песка производят при температуре 700...800 °С, а карбонатных пород — не выше 400 °С. Измельчение карбонатных пород, полевого шпата и других компонентов осуществляют до размера частиц 1...2 мм.

Для получения расплава применяют в основном ванные печи с площадью зеркала расплава 48 и 62 м^2. Отличительной особен-

Технологическая схема приготовления шихты для получения стекловолокна



ностью ванной печи для получения стекольных расплавов является большая глубина бассейна (до 800 мм) по сравнению с ванной печью для получения минеральной ваты (до 400 мм). Объясняется это следующими причинами. Стекольные расплавы характеризуются большей светопрозрачностью и большим интервалом вязкости, поэтому масса проваривается в значительно более толстом поверхностном слое, чем при плавлении минераловатного сырья.

Переработка стекольных расплавов в стекловолокно зависит от вида получаемого волокна. Промышленность производит непрерывное волокно (текстильное), применяемое для производства пряжи, тканей технического назначения, и штапельное волокно длиной от 1 до 50 см, перерабатываемое в теплоизоляционные изделия.

Текстильное волокно получают штабиковым и фильерным способами. Эти способы основаны на плавлении стеклянных палочек — штабиков или формировании нитей из расплава, пропускаемого через фильеры, и наматывании вытягиваемого волокна на вращающийся барабан. Оба эти способа малопроизводительны и для массового производства продукции, которой являются теплоизоляционные материалы и изделия, непригодны.

Переработка стекольных расплавов в штапельное волокно осуществляется в основном фильерно-дутьевым и фильерно-центробежно-дутьевым способами. Получаемое стекловолокно имеет диаметр от 1 до 10 мкм и более. Оно характеризуется высокой прочностью, вибростойкостью, тепло- и биостойкостью, малой гигроскопичностью, хорошими диэлектрическими свойствами, а также химической устойчивостью. В нем практически отсутствуют «корольки», особенно если был применен центробежно-фильерно-дутьевой способ волокнообразования. Объясняется это свойствами расплава. Он характеризуется большим интервалом вязкости и более благоприятным соотношением между вязкостью и поверхностным натяжением, чем расплавы, применяющиеся для получения минеральной ваты.

7.3. Изделия из минеральной ваты и стекловолокна

Производство изделий из минеральной и стеклянной ваты начинается с формирования минераловатного (стекловатного) ковра, которое осуществляется в камерах волокноосаждения. Эти камеры представляют собой металлические каркасы, обшитые

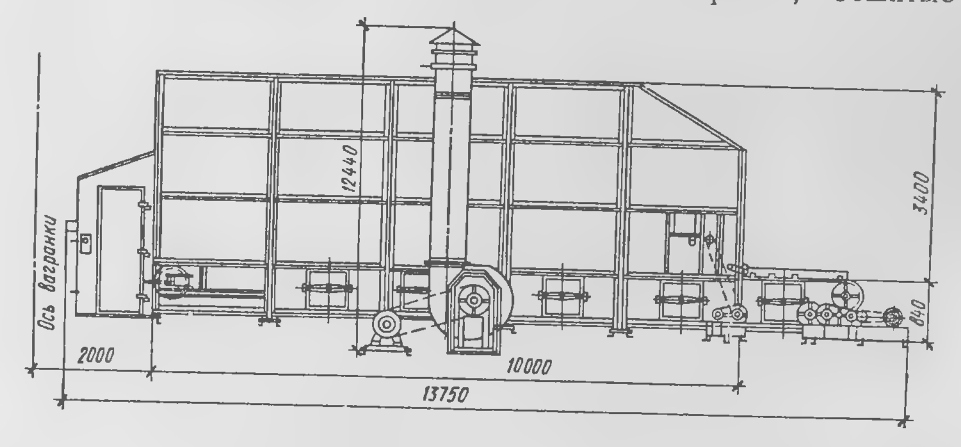


Рис. 7.21. Схема горизонтальной камеры волокноосаждения

листовой сталью с тепловой изоляцией. Дном камеры служит сетчатый или пластинчатый конвейер с шириной ленты, равной ширине камеры. Отсос отработанного воздуха из камеры происходит под конвейером, что способствует осаждению на него волокон ваты. В зависимости от направления движения энергоносителя камеры волокноосаждения могут быть горизонтальными (рис. 7.21) или вертикальными (рис. 7.22). В настоящее время технологические линии комплектуются камерами двух типов: длинными (до 20 м), предназначенными для осаждения волокна и формирования из него ковра заданной толщины путем регулирования скорости движения конвейера, и короткими с быстро движущимся транспортером, на котором происходит осаждение волокон тонким слоем. Далее эти слои поступают либо на пере-

работку в изделия, либо перекладываются с помощью маятникового устройства на медленно движущийся транспортер для формирования из них ковра нужных параметров. С целью предотвращения запыления цеха камеры выполняют из герметичных стенок, а в самих камерах создают разрежение не менее 30... 50 Па.

Для обеспыливания и повышения эластичности волокон в камеру вводят замасливатель, чаще всего эмульсол в количестве до 1% от массы волокна. Для уплотнения выходящего из камеры минераловатного ковра служит подпрессовочный валик, который устанавливают непосредственно на выходе из камеры. Подпрессованный ковер ваты после его выхода из камеры волокноосаждения с помощью специального приспособления закатывается в рулон в случае выпуска сырой (комовой) ваты или передается на следующую установку для переработки ваты в изделия. Толщина минераловатного ковра регулируется путем изменения скорости движения конвейера, которая обычно находится в пределах 0,3...2,7 м/мин или 0,6...3,5 м/мин. В рыхлом виде минеральную (стеклянную) вату применять нецелесообразно по следующим причинам: во-первых, при транспортировании и хранении вата уплотняется и ее теплоизоляционные свойства ухудшаются; во-вторых, укладка рыхлой ваты в конструкции требует большой затраты ручного труда, причем создаются тяжелые антигигиенические условия вследствие пыления и колючести ваты; в-третьих, не обеспечивается стабильность свойств теплоизоляционных конструкций из-за смачиваемости ваты или ее уплотнения при сотрясениях и особенно при вибрации. Перечисленные недостатки рыхлой минеральной ваты в значительной степени устраняются при переработке ее в изделия.

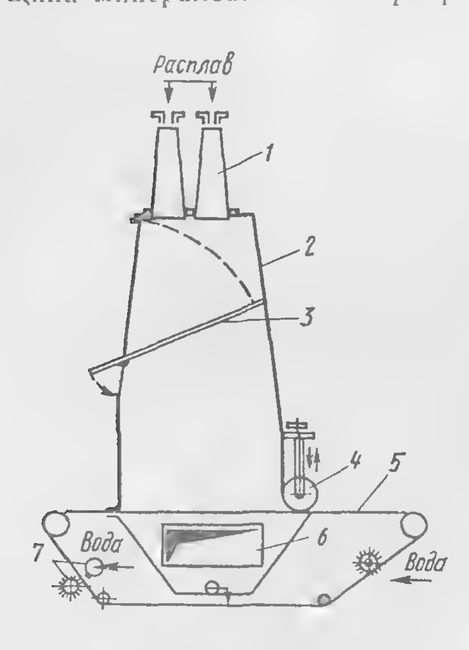


Рис. 7.22. Схема вертикальной камеры волокноосаждения.

1 — диффузор; 2 — шахта; 3 — откидной лоток для слива расплава; 4 — уплотняющий валик; 5 — перфорированный конвейер; 6 — камера отсоса; 7 — система очистки конвейера

Изделия из минеральной и стеклянной ваты выпускаются в довольно широком ассортименте. Их подразделяют на штучные (плиты, цилиндры, полуцилиндры, сегменты), рулонные (маты прошивные и на синтетическом связующем); шнуровые (шнуры, жгуты) и сыпучие (гранулированная вата).

Грануляцию применяют для получения только минераловатных гранул. При этом минеральной вате придается сыпучесть, что облегчает ее укладку в конструкции; улучшаются ее свойства: несколько повышается упругость, снижается средняя плотность за счет удаления части «корольков». Однако грануляция минеральной ваты не исключает всех недостатков, присущих рыхлой вате. Поэтому гранулированную вату чаще используют для изготовления штучных изделий.

Шнуровые материалы и прошивные маты изготовляют без применения связующих веществ. Шнуры (жгуты) получают путем набивки минеральной или стеклянной ваты в оплетку, выполненную из металлической проволоки, стеклянных или хлопковых нитей.

Изготовление прошивных матов производят путем обкладки минераловатного ковра гибкими материалами (металлической сеткой, водонепроницаемой бумагой, стеклотканью, асбестовой тканью) и прошивки изделий стеклянными или хлопковыми нитями. Маты могут прошиваться и без обкладок.

Все остальные виды изделий производят с использованием связующих веществ, которые, затвердевая, скрепляют между собой волокна в местах их пересечения, в результате чего создается волокнистый каркас различной жесткости.

Связующие вещества для получения изделий из минеральной ваты и стекловолокна немногочисленны. В производстве изделий из минеральной и стеклянной ваты используют главным образом органические связующие вещества. Неорганические связующие вследствие недостаточной адгезии к минеральным стекловидным волокнам широкого применения не получили. Их использование существенно повышает среднюю плотность минераловатных изделий, которые в этом случае характеризуются повышенной хрупкостью и невысокой прочностью.

Органические связующие (битумы, синтетические смолы и их композиции) являются основным компонентом в современном производстве изделий из минеральной и стеклянной ваты, посредством которого закрепляется пористо-волокнистая структура и обеспечивается заданная прочность этих изделий. Наиболее широкое применение нашли синтетические смолы, особенно те их разновидности, которые характеризуются высокой адгезией к минеральным и стеклянным волокнам, хорошей растворимостью в воде или способностью образовывать устойчивые эмульсии, в отвержденном состоянии — достаточно высокой когезией, водо- и температуростойкостью, эластичностью, невысокой усадкой. Кроме того, связующие не должны быть дефицитными и не выделять токсичных веществ.

Наибольшее распространение в производстве изделий из минеральной и стеклянной ваты получили фенолоформальдегидные смолы и в первую очередь термореактивные фенолоспирты.

Фенолоспирты — водорастворимые фенолоформальдегидные смолы, получаемые в виде начальных продуктов конденсации фенола с формальдегидом в присутствии щелочного катализатора. Фенолоформальдегидные смолы отвечают большинству требований, предъявляемым к связующим для минераловатных и стекловолокнистых изделий. Однако им присущ и ряд существенных недостатков: хрупкость отвержденной пленки, токсичность, недолговечность. Для улучшения клеящей способности и других свойств связующего в него вводят специальные добавки.

Из азотосодержащих смол наиболее широко применяют *карбамидные*, являющиеся продуктами взаимодействия мочевины с альдегидом. Карбамидные смолы дешевле фенолоспиртов. Получаемые с их применением минераловатные изделия характеризуются достаточно высокими физико-механическими и теплоизоляционными свойствами. Однако водостойкость изделий ниже, чем при использовании фенольного связующего. Основным недостатком карбамидных смол является отсутствие стабильности, обусловленное выделением воды и непрореагировавшего формальдегида. Это явление придает смоле гидрофильность и приводит к ее растрескиванию после отверждения.

Повышение эксплуатационных свойств синтетических связующих — одна из основных задач, успешное решение которой позволит существенно улучшить качество минераловатных и стекловолокнистых изделий, которые являются наиболее широко применяющимся теплоизоляционным материалом.

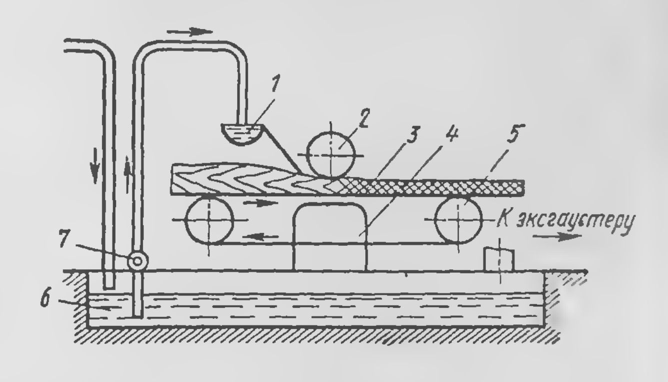
В последнее время в мировой практике все шире используют позиционные связующие, состоящие из нескольких веществ с различными свойствами, дополняющими друг друга и позволяющими повысить качество изделий. Например, на отечественных заводах применяют фенолоспирты в смеси с поливинилацетатной эмульсией и другими пластификаторами, позволяющими снизить хрупкость клеевых пленок после отверждения смолы.

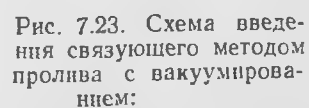
Нашли применение связующие на основе битума в виде эмульсионно-суспензионных водяных смесей, состоящих из битума и тонкодисперсного минерализатора (диатомита, бентонита и др.).

С п о с о б ы н а н е с е н и я с в я з у ю щ е г о н а в о л о к н о оказывают большое влияние на свойства минераловатных и стекловолокнистых изделий, равно как вид связующего и его содержание в материале. Все виды теплоизоляционных и звукопоглощающих изделий из минеральной ваты и стекловолокна получают способом контактного омоноличивания. Следовательно, для закрепления волокон друг относительно друга в местах их контактов должны быть образованы клеевые соединения. От качества этих соединений и их количества во многом будут зависеть физико-механические и теплоизоляционные свойства изделий. Необходимо все волокна покрывать тонким слоем связующего. В этом случае при уплотнении минераловатной массы будет образовано наибольшее число контактов.

В отечественной практике при изготовлении изделий применяют следующие способы нанесения связующих: пульверизацию, пролив с последующим отжимом и вакуумированием, приготовление гидромасс (мокрый способ).

При пульверизации раствор или эмульсию связующего наносят распылением с помощью форсунок в камере волокноосаждения, либо через паровой коллектор центробежно-дутьевой установки или полый вал валков центрифуги. Наиболее равномерное распределение связующего достигается при его подаче через паровой коллектор или под давлением через специальные форсунки. Связующее, введенное в минераловатный ковер методом пульверизации, оседает на волокнах в виде отдельных мелких капель, поэтому клеевые контакты образуются только в местах «скрещивания» волокон и только при наличии здесь капель связующего. Чем мельче капли связующего, тем равномернее они покрывают волокна и тем вероятнее образование большего числа клеевых контактов в объеме материала. Недостаток этого способа — большие потери связующего. Применение пульверизации технологически и экономически оправдано при изготовлении рулонного материала, а также мягких и полужестких плит с низкой средней плотностью.




Рис. 7.23. Схема введения связующего методом пролива с вакуумированием:

1 — ванна с желобком; *2* — отжимной вал; *3* — минераловатный ковер; *4* — патрубок; *5* — конвейер; *6* — бассейн для связующего; *7* — насос

Способ пролива заключается в том, что связующее в виде плоской струи по наклонному листу подается на минераловатный ковер по всей его ширине. В месте подачи связующего под конвейером устанавливается вакуумирующее устройство. Создание вакуума способствует проникновению связующего в глубь минераловатного ковра (рис. 7.23). Излишки связующего отжимаются уплотняющим валком и поступают в бассейн, а затем перекачиваются в расходный бак.

Применение этого способа позволяет в 2...3 раза повысить прочность изделий за счет более эффективного распределения связующего в волокнистом каркасе изделия и образования большего числа клеевых контактов.

Недостатки способа — повышенная влажность минераловатного ковра, достигающая 70...80% по массе, и невозможность получения низкой средней плотности изделий. Этот способ целесообразен при получении жестких и твердых минераловатных изделий.

Так называемый мокрый способ или способ приготовления гидромасс, при котором минеральные волокна смешивают с раствором или эмульсией связующего, применяют при изготовлении плит повышенной жесткости и твердых минераловатных плит. Приготовленная гидромасса содержит обычно 8...10% твердой фазы.

Технология минераловатных и стекловолокнистых изделий включает в себя ряд разновидностей.

Штучные изделия в зависимости от относительной деформации сжатия под нагрузкой подразделяют на следующие виды: мягкие М, полужесткие ПЖ, жесткие Ж, повышенной жесткости ППЖ и твердые Т (см. табл. 3.1). Основной объем изделий производят по конвейерной технологии, которая основана на перемещении перерабатываемой в изделия ваты через ряд технологических установок с помощью последовательно расположенных конвейеров (рис. 7.24). Способ поштучного формования применяют тогда, когда конвейерным способом нельзя получить материал с заданными свойствами.

Конвейерная технология минераловатных и стекловолокнистых изделий базируется в основном на применении синтетических связующих веществ. Она включает следующие технологические операции: приготовление водной эмульсии (раствора) синтетической смолы; введение связующего в волокнистый ковер в необходимом количестве; уплотнение ковра и его тепловую обработку; охлаждение ковра; разрезку его на изделия заданных размеров и упаковку изделий.

Приготовление связующего осуществляется в специальном отделении и сводится к дозировке концентрированной смолы и воды, обеспечивающей заданное соотношение между ними, и смешиванию этих компонентов до получения водного раствора или эмульсии.

Концентрация смолы в связующем зависит от вида смолы, ее растворимости, методов введения в волокнистый ковер, заданных свойств изделий. В зависимости от этих факторов она колеблется от 5 до 24%.

Введение связующего в минераловатный или стекловолокнистый ковер осуществляют одним из описанных выше способов.

Уплотнение ковра с введенным в него связующим осуществляют для придания изделиям заданных плотности и прочности. Достигается это путем приложения к волокнистому ковру комплекса механических нагрузок от подпрессовочных, профилирующих, фиксирующих устройств, последовательно расположенных на поточной технологической линии.

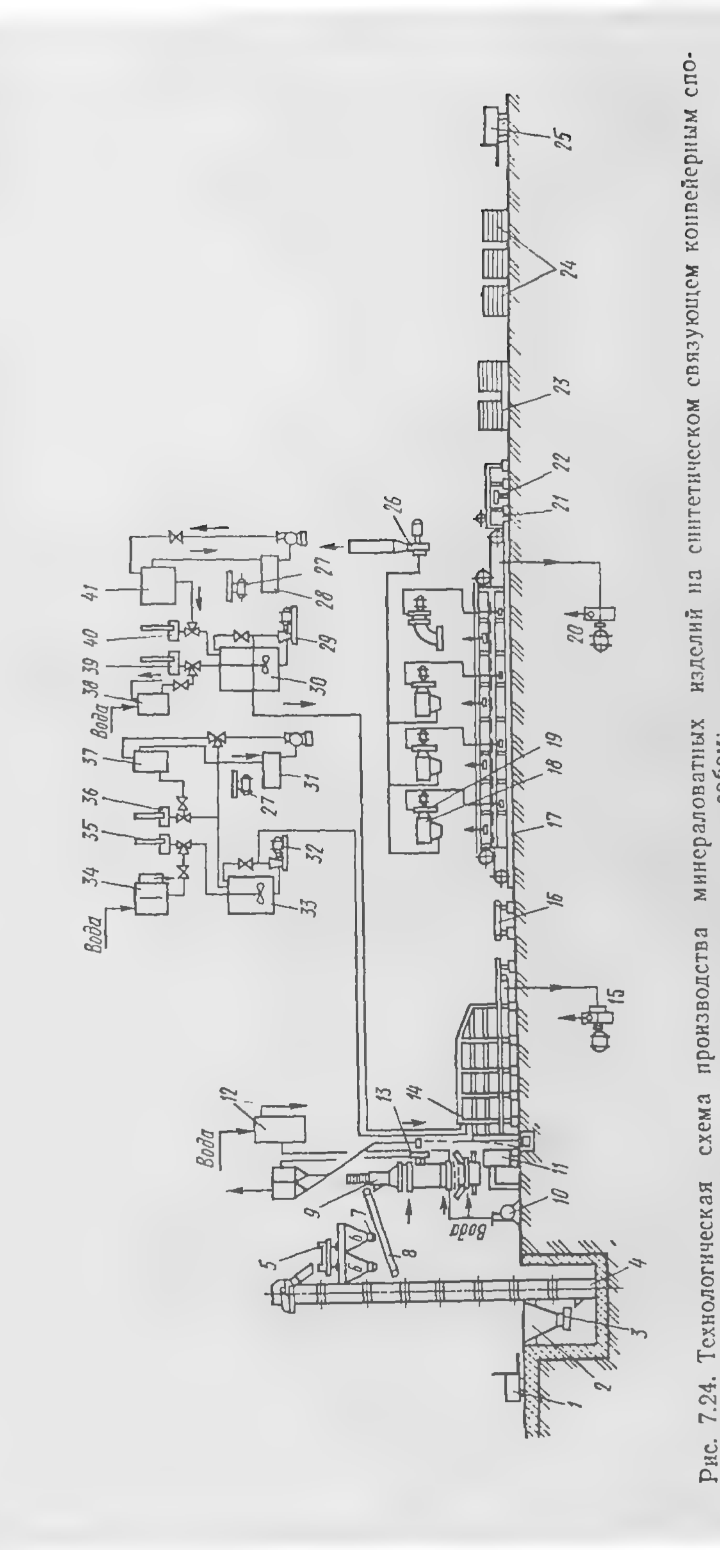


Рис. 7.24. Технологическая схема производства минераловатных изделий на синтетическом связующем конвейерным способом:

1 — автопогрузчик; *2* — бункер; *3* — качающийся питатель; *4* — элеватор; *5* — реверсивный передвижной конвейер; *6* — бункер для сырья и кокса; *7* — весовой дозатор; *8* — транспортер для загрузки вагранки; *9* — вагранка; *10* — воздуходувка; *11* — узел волокнообразования; *12* — аварийный бак для воды; *13* — дымосос; *14* — камера волокноосаждения; *15* — дымосос; *16* — промежуточный транспортер; *17* — камера тепловой обработки минераловатного ковра; *18* — автоматизированная газовая топка; *19* — рециркуляционный вентилятор; *20* — вентилятор для охлаждения; *21, 22* — ножи для продольного и поперечного раскроя ковра; *23* — щит для укладки изделий; *24* — склад готовой продукции; *25* — автопогрузчик; *26* — циркуляционный вентилятор; *27* — электрическая таль; *28* — приемный бак для концентрированной смолы; *29* — насос; *30* — бак-мешалка для разведения смолы; *31* — приемный бак эмульсола; *32* — насос; *33* — бак-мешалка для разведения эмульсола; *34* — бак для воды; *35* — дозатор воды; *36* — дозатор эмульсола; *37* — расходный бак для эмульсола; *38* — расходный бак для воды; *39* — дозатор воды; *40* — дозатор для концентрированной смолы; *41* — расходный бак для концентрированной смолы

Минераловатный (стекловолокнистый) ковер с введением в него связующих представляет собой анизотропную волокнистую пространственную систему с преимущественно горизонтальным расположением волокон. Уплотнение волокнистого ковра при конвейерном способе производства изделий осуществляют путем приложения нагрузки перпендикулярно плоскости преимущественной ориентации волокон. При этом элементарное волокно работает на поперечный изгиб как неразрезная свободно опертая балочка, опорами которой в данном случае являются точки пересечения горизонтально ориентированных волокон.

Обязательное наличие в волокнистом ковре волокон другой ориентации, а. также волокон криволинейной формы предопределяет упругие свойства волокнистого ковра. Поэтому после снятия уплотняющей нагрузки упругие деформации исчезают и первоначальная толщина ковра частично восстанавливается. Пластические деформации ковра предопределяют неполное восстановление его первоначальной толщины.

Так как минераловатный ковер представляет собой не сплошное тело, а дискретную пространственную систему, то с точки зрения классической механики термины «упругая» и «пластическая» деформации к нему не применимы. Поэтому деформации волокнистого ковра принято называть «восстанавливающаяся» и «остаточная».

Доля остаточной деформации минераловатного ковра независимо от усилия прессования составляет примерно 70%. Стекловолокнистый ковер обладает значительно большей восстанавливающей способностью вследствие повышенной упругости стеклянных волокон, поэтому доля остаточной деформации в нем меньше. Поперечная же деформация волокнистого ковра очень мала и не превышает 0,1%. Таким образом, напряженное состояние ковра под нагрузкой ближе всего к состоянию «чистого» сжатия.

Наличие восстанавливающейся деформации вызывает необходимость применения фиксирующих устройств, обеспечивающих получение изделий заданной толщины. Так как наиболее жесткое закрепление волокнистого каркаса может быть достигнуто после отверждения связующего, которое происходит при тепловой обработке, то фиксирующие устройства устанавливаются в камере тепловой обработки. Эту роль выполняет конвейер, расположенный в верхней части камеры термообработки. Нижняя лента этого конвейера фиксирует толщину ковра, пропитанного связующим, двигаясь с одинаковой с ним скоростью вдоль камеры. Таким образом, вплоть до отверждения связующего ковер зажимается между верхней лентой нижнего и нижней лентой верхнего конвейеров, чем и обеспечивается фиксация его толщины. На некоторых заводах в качестве фиксирующего устройства применяют рольганг вместо верхнего конвейера.

Тепловая обработка минераловатного (стекловолокнистого) ковра осуществляется путем прососа горячих дымовых газов или

воздуха через слой ковра, когда он проходит по конвейеру камеры тепловой обработки. Во время этой операции из ковра удаляется влага и происходит отверждение связующего. Конструкция камеры тепловой обработки должна обеспечивать постоянство температуры и скорости газов по всей площади ковра. Не допускается выбивание газов в помещение цеха, поэтому герметизация камеры должна быть надежной.

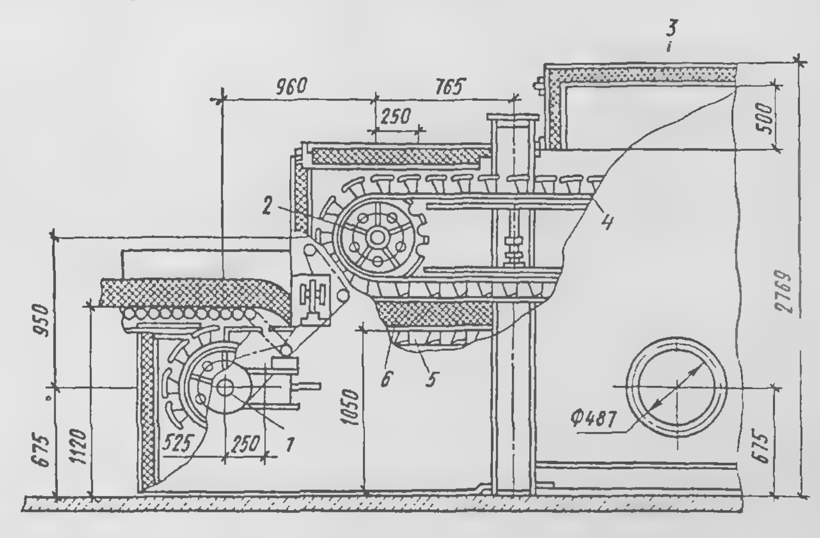


Рис. 7.25. Камера тепловой обработки:

1 — натяжной барабан нижнего конвейера; *2* — то же, верхнего; *3* — ограждающая конструкция камеры; *4* — верхний пластинчатый конвейер; *5* — то же, нижний; *6* — минераловатный ковер

Наиболее удачным конструктивным решением камеры тепловой обработки следует считать позонную подачу теплоносителя, когда рабочее пространство камеры по длине разделено на несколько зон, снабженных самостоятельными отопительно-вентиляционными устройствами. В таких камерах обеспечивается многократное прохождение теплносителя через обрабатываемый волокнистый ковер, вследствие чего существенно ускоряются процессы сушки и отверждения связующего (рис. 7.25). При введении связующего распылением в камере тепловой обработки достаточно создания двух зон, при проливе ковра связующим, как правило, создают четыре зоны. Длина зон должна обеспечивать равномерное распределение теплоносителя по площади ковра и размещение отопительно-вентиляционного оборудования. Этим условиям удовлетворяет длина зоны 6...8 м.

Общая длина камеры зависит от производительности плавильного агрегата, толщины ковра, степени его уплотнения, вида связующего и влажности ковра, поступающего на термообработку. Чем толще минераловатный ковер, тем больше он уплотнен и

чем выше его влажность, тем больше требуется времени на его термообработку и тем длиннее должна быть камера термообработки. Обычно ее размеры колеблются от 12 до 30 м. Тепловую обработку ковра следует осуществлять при максимальных для данного вида связующего температурах: для фенолоспирта — 250 и 180 °C (соответственно при удалении и после удаления влаги); для мочевиноформальдегидной смолы — 130 °C; для формальдегидной водоэмульсионной смолы — 130 °C; для гипталевой и глицериномаленновой смол — 180 °C. Превышение этих значений температуры может привести к деструкции отвердевшего связующего. В зависимости от толщины ковра, степени его уплотнения и увлажнения при обеспечении равномерного прогрева продолжительность тепловой обработки составляет от 3,5 до 18...20 мин.

Весьма важным фактором, влияющим на качество изделий, является режим охлаждения ковра, который во избежание трещинообразования в пленках связующего и, следовательно, снижения физико-механических свойств изделий не должен быть резким. Обычно охлаждение ковра осуществляют на открытом конвейере без принудительного отбора теплоты.

Раскрой ковра на плиты производят с помощью пил продольной и поперечной резки. Затем изделия упаковывают и отправляют на склад готовой продукции.

Производство минераловатных цилиндров (полуцилиндры, сегменты) на синтетическом связующем имеет свои особенности. Этот вид минераловатных изделий широко применяют для тепловой изоляции трубопроводов. Криволинейные изделия вырабатывают из минеральной ваты, пропитанной синтетическим связующим, способами навивки и горячего прессования в матрицах. В зависимости от средней плотности изделия имеют марки 100, 150 и 200.

Способ навивки позволяет получать цилиндры и полуцилиндры полужесткого типа различных диаметров. Для этого используют навивочные станки (рис. 7.26).

Минераловатный ковер с нанесенным на него связующим выходит из камеры волокноосаждения толщиной не более 30 мм, что достигается увеличением скорости конвейера, и поступает на станок. Прорезиненная лента огибает ряд барабанов. Она служит одновременно формирующим и транспортирующим рабочим органом. Минераловатный слой навивается на перфорированные металлические скалки, так как он затягивается между скалкой и огибающей ее лентой. По достижении заданной толщины слоя срабатывает концевой выключатель, пневмоцилиндр переводит качающиеся кронштейны в горизонтальное положение, а включающийся электродвигатель за счет увеличения скорости движения ленты позволяет оторвать намотанный на скалку цилиндр от минераловатного ковра. Готовый цилиндр вместе со скалкой подается к станку для прокатки и калибровки. Калибровочный станок состоит из двух ленточных конвейеров и цепного конвейера

с гнездами для скалок с навитыми на них цилиндрами. Находясь в гнездах цепного конвейера, цилиндры на скалках прокатываются между лентами двух конвейеров, при этом минеральная вата уплотняется и происходит калибровка цилиндров.

Тепловая обработка откалиброванных цилиндров осуществляется в специальной камере, куда они поступают с влажностью 10...12%. В течение 15 мин цилиндры высушиваются до влажно-

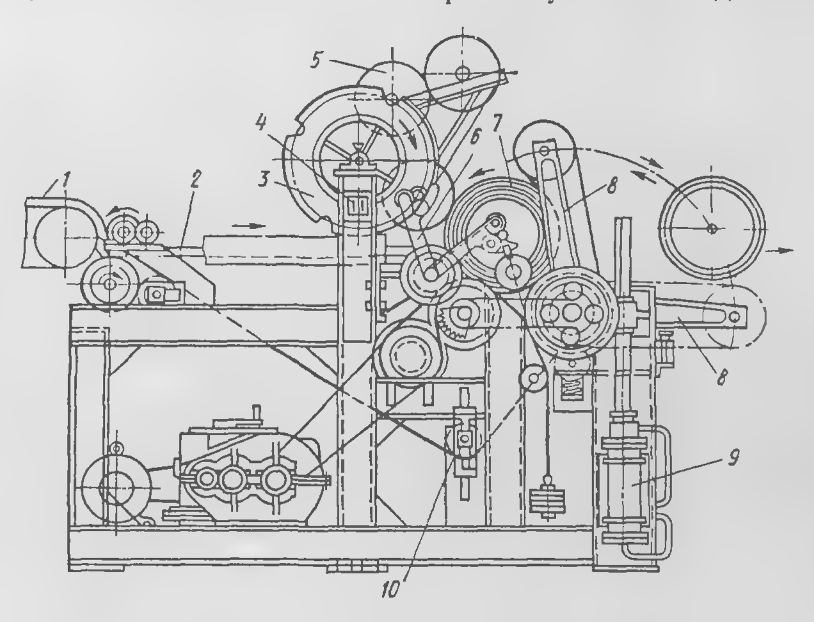


Рис. 7.26. Станок для навивки минераловатных цилиндров:

1 — минераловатный ковер; *2* — прорезиненная лента; *3* — зубчатые диски; *4* — электромагнит; *5* — перфорированные скалки; *6* — кронштейны; *7* — барабан для навивки цилиндров; *8* — качающиеся кронштейны; *9* — пневмоцилиндр; *10* — натяжная станция

сти 0,2...0,3% и за счет отверждения связующего приобретают механическую прочность. Тепловая обработка изделий осуществляется путем просасывания теплоносителя с температурой 140... 180 °C через скалку и минераловатный слой. Снятые со скалок цилиндры разрезают в поперечном направлении в соответствии с заданной длиной. Для удобства монтажа цилиндры разрезают вдоль по образующей с одной стороны и делают надрез с противоположной внутренней стороны на глубину 10...15 мм.

Полуцилиндры и сегменты производят путем уплотнения пропитанной связующим минераловатной заготовки в фасонных горячих формах, в которых осуществляется и тепловая обработка изделий.

Производство минераловатных плит повышенной жесткости является наиболее перспективным. Физико-механические свойства минераловатных изделий во многом зависят

от ориентации волокон по отношению к действующей нагрузке.

В камере волокнообразования волокнистый ковер формируется из волокон, преимущественно ориентированных в горизонтальном направлении. Поэтому изделия, изготовленные из такого ковра, характеризуются невысокой прочностью при сжатии, т. е. когда нагрузка действует перпендикулярно слоистости ковра.

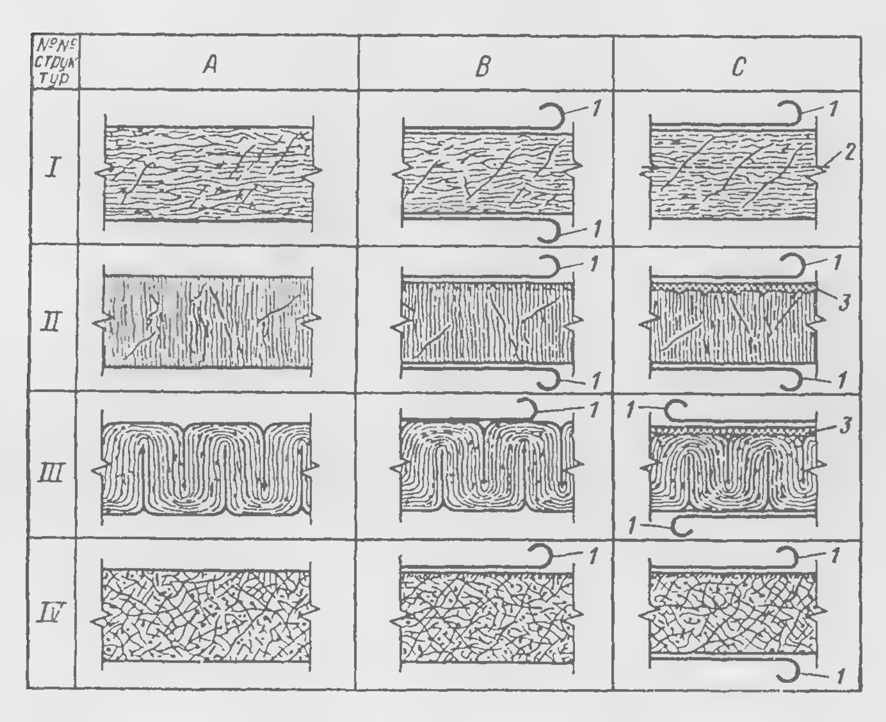


Рис. 7.27. Разновидности структуры минераловатных изделий:

A — виды волокнистого каркаса; *B* и *C* — изделия повышенного качества с гидроизоляционным (отделочным), армирующим и упрочняющим слоями; *I* — с преимущественно горизонтальной ориентацией волокон; *II* — то же, вертикальной; *III* — с горизонтально-вертикальной ориентацией волокон (гофрированный минераловатный ковер); *IV* — с пространственной ориентацией волокон; *1*, *2*, *3* — соответственно гидроизоляционный (отделочный), армирующий и упрочняющий слои

В практике строительства есть большая необходимость повышения прочности при сжатии минераловатных изделий, например при устройстве тепловой изоляции покрытий промышленных зданий, когда теплоизоляционный материал укладывается по профилированным металлическим настилам и покрывается гидроизоляционным слоем. В этом случае теплоизоляционный материал испытывает сжимающие нагрузки и его сжатие, например, в результате давления снега крайне нежелательно, так как влечет за собой повышение теплопроводности.

На показатель прочности минераловатных изделий большое влияние оказывают: ориентация волокон по отношению к направлению сжимающей нагрузки, количество введенного в материал связующего, степень уплотнения материала в процессе изготовления изделий, способ формования изделий. На практике, применяя различные способы, получают минераловатные изделия разной плотности и с различной ориентацией волокон по отношению к действующей эксплуатационной нагрузке. На рис. 7.27 приведены различные виды волокнистой структуры минераловатных изделий, а на рис. 7.28 — зависимость прочности при сжатии от вида структуры, способа изготовления и средней плотности изделий.

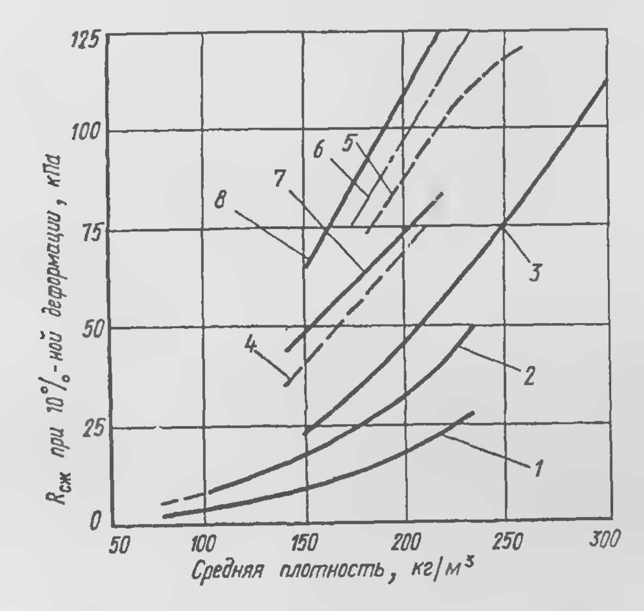


Рис. 7.28. Зависимость прочности при сжатии минераловатных плит от их структуры и средней плотности:

1, *2*, *3* — изделия с горизонтально-слоистой структурой, изготовленные на устаревшем (*1*), модернизированном (*2*) оборудовании и способом горячего прессования (*3*); *4*, *5* — изделия с гофрированной структурой без упрочняющего (*4*) и с упрочняющим (*5*) слоем; *6* — изделия с пространственной структурой, изготовленные из гидромасс; *7*, *8* — изделия с вертикально-слоистой структурой, изготовленные способом двойной переработки из готовых плит горизонтальной слоистости (*7*) и непосредственно из минераловатного ковра горизонтальной слоистости и неотвержденного связующего (*8*)

Анализ кривых (рис. 7.28) позволяет сделать вывод о том, что создание структуры с пространственной и вертикальной ориентацией волокон способствует существенному повышению прочности изделий.

Получают такие структуры различными способами, из которых наибольшее распространение получили мокрый способ, основан-

ный на приготовлении гидромасс, и переработка ковра или плит горизонтальной слоистости в изделия с вертикальной ориентацией волокон.

Мокрый способ изготовления плит состоит из трех основных операций: приготовления гидромассы, формования из нее непрерывного минераловатного ковра и его тепловой обработки. Приготовление гидромассы производят в смесителях непрерывного или периодического действия роторного и валкового типов. Минеральную вату перед подачей в смеситель разрыхляют на специальных машинах. Смешивание волокна с рабочим раствором связующего существенно облегчается при введении пенообразователя. В этом случае образовавшиеся пузырьки пены играют роль шарниров и снижают трение между волокнами, способствуя образованию однородной гидромассы без наличия в ней комков ваты.

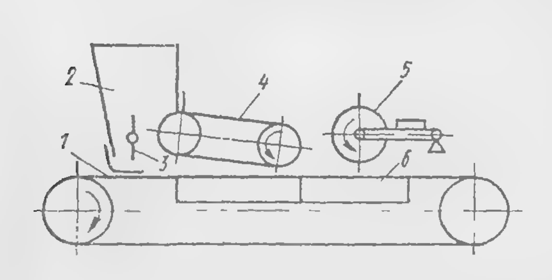


Рис. 7.29. Схема формования ППЖ способом подпрессовки

Гидромасса поступает в бункер формовочного устройства. Формование плит повышенной жесткости (ППЖ) производят способами подпрессовки и отливкой ковра с последующим вакуумированием и калибровкой.

При формовании ковра способом подпрессовки (рис. 7.29) верхний конвейер *4* вплотную примыкает к расходному бункеру *2*. Угол наклона конвейера к горизонтальной оси может меняться от 4 до 15° в сторону выхода ковра. Гидромасса захватывается нижней и верхней ветвями конвейеров *4* и *1*, которые движутся синхронно. Дозирование гидромассы осуществляется поворотом шибера *3*. По мере прохождения между ветвями конвейеров она подпрессовывается, из нее удаляется избыток раствора связующего, чему способствует наличие вакуум-ящика *6*. Остаточная влажность ковра находится в пределах 35...100% и зависит от свойств гидромассы, степени подпрессовки, режима вакуумирования. Окончательная калибровка ковра по толщине осуществляется при его прохождении под валком *5* или в камере тепловой обработки.

Способ подпрессовки позволяет использовать исходные гидромассы с отношением «твердая фаза: жидкость» от 1 : 3 до 1 : 10. Это обеспечивает получение изделий с однородной структурой из пространственно ориентированных волокон. Расход связующего составляет 5...6%, средняя плотность получаемых плит не превышает 200 кг/м^3, а прочность на сжатие при 10%-ной деформации составляет 0,08...0,1 МПа.

Производство ППЖ способом отливки осуществляют по схеме, приведенной на рис. 7.30. В этом случае гидромассу, состоящую из воды, фенолспиртов, пенообразователя и минеральной ваты, приготовляют в смесителе 1 и насосом 2 подают к узлу формования. Гидромасса, выходящая из бункера через щель, образованную верхней ветвью нижнего конвейера 3 и передней стенкой бункера *4*, распределяется на конвейере в виде сплошного ковра. При движении над вакуум-ящиком 6 ковер обезвоживается. Калибровка ковра по толщине осуществляется верхним конвейером 5. Пройдя камеру тепловой обработки 7, ковер разрезается на плиты требуемых размеров, которые упаковываются и отправляются на склад готовой продукции. В зависимости от степени уплотнения и расхода связующего, который колеблется от 8 до 12%, средняя плотность плит находится в пределах 150...300 кг/м^3, а прочность при 10%-ном сжатии составляет соответственно 0,06...0,2 МПа.

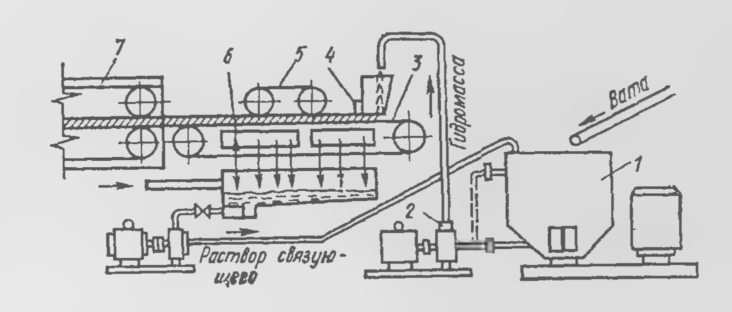


Рис. 7.30. Схема производства минераловатных плит повышенной жесткости способом отливки из гидромассы

Производство плит повышенной жесткости с вертикально ориентированными волокнами осуществляют в основном двумя способами: с одностадийной тепловой обработкой (кубовая технология) и с двустадийным прогревом.

Кубовая технология заключается в следующем (рис. 7.31). Пропитанный связующим минераловатный ковер после уплотнения на подпрессовщике и калибровки разрезается на плиты размером 1×1 м. Полученные заготовки отделяются от ковра и вилочным захватом загружаются одна на другую в форму карусельной установки до образования минераловатного массива кубической формы. Затем поворотом карусельной установки массив подается на пост подпрессовки, после осуществления которой он приобретает размеры 100×100×100 см. Следующий поворот карусельной установки подает массив на тепловую обработку, которая производится путем продувки массива горячими газами

(180...200 °С) в течение 3 мин. На следующем посту производят выпрессовку кубической заготовки из формы и доставляют ее к резательной машине. Разрезку куба на плиты осуществляют перпендикулярно расположению основной массы волокон, вследствие чего волокна в полученных плитах имеют вертикальную ориентацию.

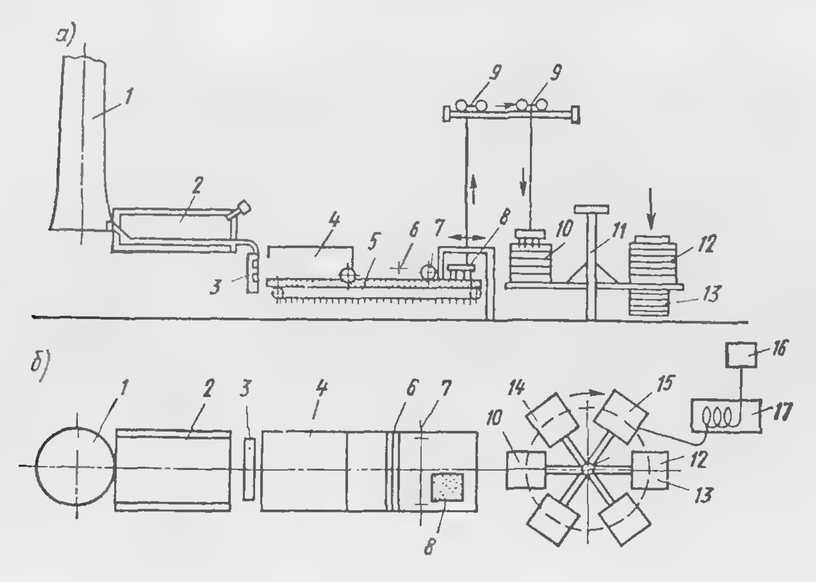


Рис. 7.31. Схема установки для получения заготовок-кубов:

1 — вагранка; *2* — обогреваемый фидер; *3* — многовалковая центрифуга; *4* — камера волокноосаждения; *5* — конвейер; *6, 7* — ножи поперечного и продольного раскроя минераловатного ковра; *8* — вилочный захват; *9* — тельфер; *10* — формы карусельной установки; *11* — карусельная установка; *12* — пост выпрессовки заготовок; *13* — заготовка кубической формы; *14* — пост подпрессовки; *15* — пост продувки (тепловой обработки); *16* — компрессор; *17* — подтопок

Этот способ позволяет получать ППЖ со средней плотностью 170...200 кг/м³ и с прочностью при 10%-ном сжатии 0,08...0,11 МПа при расходе связующего 4...6 %.

Второй способ получения ППЖ основан на использовании минераловатного ковра или мягких и полужестких плит горизонтальной слоистости, уже прошедших тепловую обработку. В этом случае ковер или плиты разрезают на полосы, которые поворачивают на 90° и приклеивают битумной мастикой к покровному материалу. После сушки изделия упаковывают и направляют на склад готовой продукции. Схема установки приведена на рис. 7.32.

Конвейерный способ получения ППЖ, разработанный в МИСИ им. В. В. Куйбышева Ю. Л. Бобровым, весьма интересен и перспективен. Схема такой конвейерной линии показана на рис. 7.33, *а*. Этот способ позволяет получать изделия полной заводской готовности с изоляционно-отделочным и армирующим слоями. В качестве изоляционно-отделочного слоя применяют битуминизированную бумагу, пергамент, рубероид, фольгоизол, а в качестве армирующего — стеклосетку или стеклохолст.

Поточная линия работает следующим образом. Силикатный расплав, вытекающий из плавильного агрегата *1*, перерабатывается в волокно на центрифуге *2;* навстречу движения волокна в камере волокноосаждения *3* распыляется раствор связующего

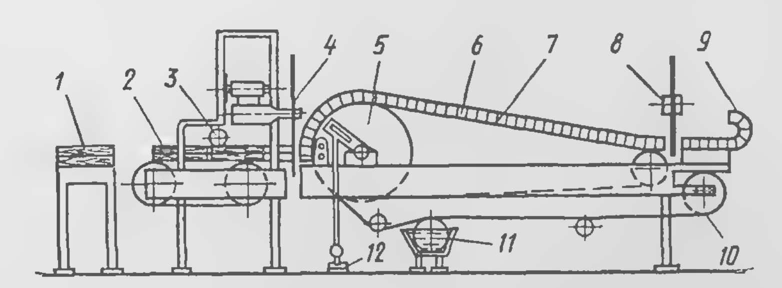


Рис. 7.32. Схема установки для получения матов вертикальной слоистости из готовых плит:

1 — приемный стол; *2* — подающий транспортер; *3* — прижимной барабан; *4* — нож для резки плит на полосы; *5* — упорный барабан; *6* — минераловатный мат вертикальной слоистости; *7* — приемный транспортер; *8* — дисковый нож поперечной резки; *9* — готовая продукция; *10* — рулон покровного материала; *11* — узел нанесения битумной мастики; *12* — привод упорного барабана

(фенолспиртов); волокна, обработанные связующим, расход которого составляет в этом случае 4...6% по массе, осаждаются на сетчатом транспортере *20* в виде непрерывного ковра *4* с преимущественно горизонтальным расположением волокон. Раствор связующего может быть также введен методом пролива с вакуумированием перед наклонным транспортером.

После введения связующего ковер поступает на наклонный транспортер *5*, уплотняется парными валками *6* и поступает в устройство *8*, в котором производится изменение структуры ковра — перевод волокон из горизонтальной в вертикальную ориентацию. Для этого минераловатный ковер ножом гильотинного типа *7* разрезается на поперечные полосы, равные толщине изготовляемого изделия, которые после выхода из устройства *8* образуют на верхней ветви конвейера *18* непрерывный ковер *17* с вертикальным расположением волокон.

После выравнивания его поверхности под узлом *9* и тепловой обработки в камере *10* образуется непрерывная лента материала из минерального волокна вертикальной слоистости *11*, на которую при необходимости могут быть наклеены обкладочные или облицовочно-отделочные слои *12* и *16*. Затем продольными и поперечными ножами *13* лента разрезается на плиты заданных размеров *14*, которые упаковываются в пакеты на установке *15*.

Наиболее ответственной операцией является переориентация волокон в минераловатном ковре, осуществляемая в устройстве *8*.

В исходном положении (рис. 7.33, *б*) подвижный нож *7* находится выше уровня нижней ветви верхнего уплотняющего валка *6*, а прикрепленная к нему плита-толкатель *21* упирается в верхнюю поверхность уплотненного минераловатного ковра *22*. Затем

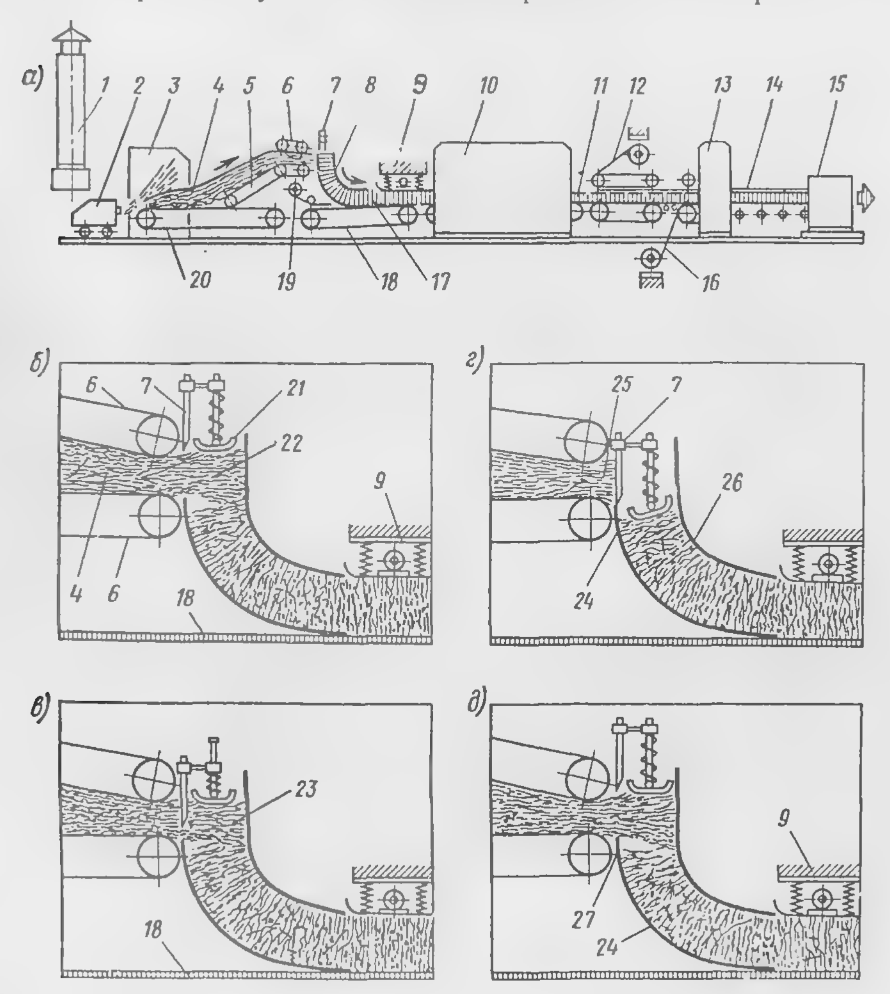


Рис. 7.33. Поточная технологическая линия для изготовления минераловатных плит вертикальной слоистости:

а — схема производства; *б, в, г, д* — соответственно положение рабочих органов резательного устройства в период резки минераловатного ковра на полосы

(рис. 7.33, *в*) нож *7* при движении вниз отсекает от ковра полосу *23*. При этом плита-толкатель *21* продвигает отрезанную полосу внутрь криволинейного участка *26* массопровода, одновременно подпрессовывая ее (рис. 7.33, *г*). Отрезав полосу, нож с плитой-толкателем возвращается в исходное положение, а ковер из

положения *25* приходит в положение *22* (рис. 7.33, *д*) и эти операции повторяются непрерывно. Частота резки ковра на полосы зависит от толщины изготовляемых изделий, производительности линии, определяемой скоростью движения сетчатого конвейера камеры волокноосаждения, и для изделий толщиной 40...120 мм колеблется в пределах 1,2...3,0 с.

Роль неподвижного ножа выполняет верхняя съемная часть *27* наружной стенки *24* массопровода. На такой линии возможно формование изделий на стеклосетке или стеклохолсте. В этом случае стеклохолст (стеклосетка) поступает с ролика *19* на наружную поверхность конвейера *18* (рис. 7.33, *а*), проходит под низом наружной стенки массопровода и становится подложкой для минераловатного ковра. В камере тепловой обработки происходит склеивание стеклосетки с ковром. Для выравнивания верхней поверхности ковра при его выходе из массопровода эффективно применять виброуплотнение с помощью виброплиты *9* (рис. 7.33, *а, д*), колебания которой должны производиться с частотой 10...30 Гц при амплитуде 5...10 мм.

Рассмотренный способ прост и экономичен, получаемые изделия характеризуются достаточно высокими свойствами.

Следует отметить, что ППЖ с вертикальным расположением волокон характеризуются большей (на 15...20%) теплопроводностью, чем ППЖ, полученные из гидромасс. Поэтому при устройстве тепловой изоляции их толщина должна быть соответственно увеличена.

Технология полужестких и жестких минераловатных плит на битумном связующем имеет свои особенности, связанные с приготовлением связующего, его введением в минераловатный ковер и режимом тепловой обработки.

Приготавливают битумное связующее следующим образом. Битумы разных марок (III и V) сплавляют при температуре 175... 180 °С и перекачивают насосом в бак-смеситель, туда же загружают канифольный порошок. Одновременно готовят суспензию минерального наполнителя, который вводят в связующее для повышения жесткости и огнестойкости плит. В качестве минерального наполнителя применяют диатомит, трепел, каолиновые или бентонитовые глины. Водную суспензию получают в глиносмесителе, добавляя в смесь раствор едкого натра, который пептизирует каолин и вследствие этого повышает стойкость суспензии. Концентрированную битумно-глиняную эмульсию получают в диспергаторе, а затем в баке с пропеллерной мешалкой разбавляют ее водой до рабочей концентрации (2...3%). Такую эмульсию применяют для изготовления полужестких и жестких плит.

При получении полужестких плит связующее вводят, как правило, методом распыления в количестве 15%. Уплотнение ковра производят одним из описанных выше способов. Сушат ковер при температуре в начале процесса 200...250 °С, а в конце, после уда-

Таблица 7.5. Виды и основные свойства минераловатных изделий

Материал	Прочность, МПа, не менее		Сжимаемость, %, не более	Содержание связующего, %, не более	Теплопроводность, Вт/(м·°С), в сухом состоянии при температуре, °С		Предельная температура применения, °С, не более
	при сжатии	при растяжении			25±5	125±5	
Плиты теплоизоляционные из минеральной ваты на синтетическом связующем, ГОСТ 9573—82 (СТ СЭВ 1566—79), марки:							
50, 75	—	0,008	—	3	0,047	0,077	400
125, 175	—	—	6 ... 15	4 ... 5	0,049 ... 0,052	0,07 ... 0,072	400
200, 300	0,04 ... 0,12	—	—	7 ... 8	0,056 ... 0,06	—	400
Плиты минераловатные повышенной жесткости на синтетическом связующем, ГОСТ 22950—78 ($\rho_{ср}=200\pm25$ кг/м³)	0,1	—	—	10	0,045	—	—
Плиты минераловатные на битумном связующем, ГОСТ 10140—80, марки:							
75, 100	—	0,0075 ... 0,008	45 ... 35	5	0,046	—	От —100 до +60
150	—	—	27	16	0,052		От —100 до +60
200, 250	0,1 ... 0,12	—	6 ... 5,5	17 ... 18	0,05[illegible] ... 0,064	—	От —100 до +60
Маты теплоизоляционные из минеральной ваты вертикально-слоистые, ГОСТ 23307—78*, марки 75, 125	—	—	5,0 ... 3,0	—	0,053 ... 0,051	0,088 ... 0,084	От —120 до +300

Продолжение табл. 7.5

Материал	Прочность, МПа, не менее		Сжимаемость, %, не более	Содержание связующего, %, не более	Теплопроводность, Вт/(м·°С), в сухом состоянии при температуре, °С		Предельная температура применения, °С, не более
	при сжатии	при растяжении			25±5	125±5	
Цилиндры и полуцилиндры теплоизоляционные из минеральной ваты на синтетическом связующем, ГОСТ 23208—83 (СТ СЭВ 3476—81), марки 100, 150, 200	—	—	0,015 ... 0,025	5	0,048 ... 0,052	0,067 ... 0,073	
Шнуры теплоизоляционные ТУ 36-1695—79, $\rho_{ср}$, кг/м³: 100, 150, 200, 250, 300, 350	—	—	10	—	0,064	—	До 1100
Войлок эластичный из минеральной ваты на синтетическом связующем, ТУ 36-2111—78, марки 50, 75	—	0,004	—	1,5	0,046	0,07 ... 0,077	От —180 до +600
Маты минераловатные прошивные для тепловой изоляции промышленного оборудования, ГОСТ 21880—86 (СТ СЭВ 5067—85), марки 100, 125	—	—	—	—	0,044	0,065	От —180 до +700

ления влаги, при 150°С. Затем ковер раскраивают на плиты, которые упаковывают и складируют.

Жесткие плиты, полуцилиндры, сегменты изготовляют из гидромасс в фильтрующих пресс-формах. Остаточная влажность отформованных изделий составляет 65...75%, при прессовании с вакуумированием — 45...60%. Сушка отформованных изделий производится на поддонах в туннельной сушилке в течение 10...22 ч.

Технология твердых плит на синтетическом связующем отличается тем, что пропитанный связующим минераловатный ковер по выходе из камеры волокноосаждения разрезается на заготовки, которые на металлических поддонах поступают на прессование в гидравлический многополочный пресс.

Твердые плиты характеризуются повышенной средней плотностью (более 250 кг/м³) и прочностью при сжатии 0,8...1,2 МПа при 10%-ной деформации. Свойства изделий из минеральной ваты и стекловолокна приведены в табл. 7.5 и 7.6.

Таблица 7.6. **Виды и основные свойства стекловолокнистых изделий**

Вид изделий (ГОСТ 10499—78)	Прочность при сжатии, МПа, не менее	Сжимаемость, %, не более	Теплопроводность, Вт/(м·°С), при 25±5°С	Температура применения, °С, не более
Плиты строительные:				
ПЖС-175, ПЖС-200	0,03 ... 0,04	10	0,052 ... 0,057	От —60
ПСС-50, ПСС-75	—	—	0,047	до +180
Плиты технические:				
ППТ-40, ППТ-50, ППТ-75	—	—	0,044 ... 0,047	От —60 до +180
Маты строительные:				
МС-35, МС-50	—	—	0,047	То же
Маты технические:				
СТ-35, МТ-50	—	—	0,047	«

Минераловатные изделия широко применяют для тепловой изоляции строительных ограждающих конструкций и промышленного оборудования. Их используют в качестве теплоизоляционного слоя в трехслойных стеновых панелях (прошивные маты, полужесткие и жесткие плиты на синтетическом связующем). Тепловую изоляцию стыков обеспечивают, применяя шнуровые изделия (шнуры и жгуты). Для утепления покрытий промышленных зданий в основном применяют плиты повышенной жесткости. На рис. 7.34 показаны элементы конструкций стен (I) и покрытий (II) с минераловатными утеплителями. В большом объеме минераловатные изделия используют для тепловой изоляции горячих трубопроводов (цилиндры, сегменты, полуцилиндры, маты). Прошивные маты из высокомодульных расплавов являются хорошим материалом для тепловой изоляции горячих поверхностей (до 600...700°С) промышленных тепловых установок.

Минераловатные изделия на битумном связующем применяют при рабочей температуре до 60°С.

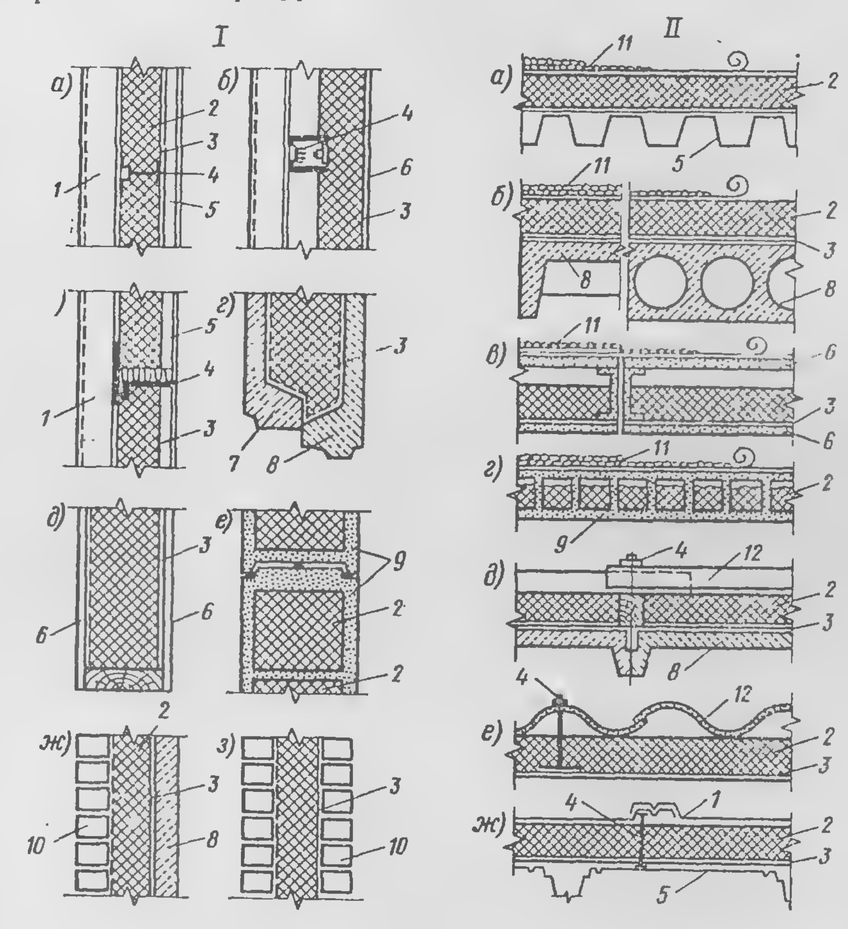


Рис. 7.34. Конструкции стен (I, *а—з*) и покрытий (II, *а—ж*) с минераловатными утеплителями:

1 — наружный металлический профилированный лист; *2* — минераловатный утеплитель; *3* — пароизоляционный слой; *4* — соединительный элемент; *5* — внутренний металлический профилированный лист; *6* — асбестоцементные и другие плоские листы; *7* — наружный железобетонный слой; *8* — внутренний железобетонный слой; *9* — экструзионная асбестоцементная панель; *10* — кирпич; *11* — рулонная кровля на мастике по минераловатному теплоизоляционному слою; *12* — асбестоцементные листы волнистого профиля

Изделия из стеклянной ваты используют для строительной и монтажной изоляции, а также в качестве акустических материалов. Стеклянное волокно и изделия из него характеризуются хорошей вибростойкостью. Поэтому их применяют для тепловой изоляции подвижного состава железных дорог, в авиа- и судо-

строении, а также для изоляции трубопроводов, подверженных сотрясениям и вибрации.

По своим свойствам изделия из стеклянной ваты превосходят минераловатные, однако их стоимость выше, для получения стекольных расплавов требуется дефицитное сырье (сода). Эти обстоятельства являются основной причиной ограниченности объема производства стекловолокнистых материалов.

7.4. Состояние и перспективы развития производства минераловатных и стекловолокнистых изделий

Минеральная вата и изделия из нее являются основным видом теплоизоляционных материалов. Хотя выпуск этих изделий в 1985 г. остался примерно на уровне 1980 г., в их качественной структуре произошли существенные изменения. Резко (в 2,4 раза) увеличился выпуск эффективных плит повышенной жесткости и уменьшился выпуск малоэффективной товарной ваты (на 23,3%), плит на битумном связующем (на 12,1%). Эта тенденция качественного изменения минераловатных изделий сохраняется и далее.

В ближайшие годы предстоит: дальнейшее увеличение производительности плавильных агрегатов и технологических линий по производству минераловатных изделий; создание новых плавильных печей с высоким КПД, позволяющих получать силикатные расплавы высокого качества с заданными свойствами; разработка высокопроизводительного оборудования для узлов волокнообразования, обеспечивающего резкое сокращение или полное исключение отходов расплава и повышение качества волокна; разработка новых долговечных видов связующих веществ, позволяющих существенно повысить качество минераловатных изделий, исключить имеющий место дефицит высококачественных связующих в минераловатном производстве; совершенствование способов создания волокнистых структур, имеющее целью оптимизацию свойств минераловатных изделий для различных условий их службы, повышение надежности теплоизоляционных конструкций.

В качестве примера повышения качества минераловатных изделий путем совершенствования их технологии можно привести разработанный УралНИИстромпроектом и МИСИ им. В. В. Куйбышева способ получения минераловатных изделий различного назначения *с гофрированной структурой.*

В основу этого способа положен известный в технике эффект повышения упругопрочностных свойств гибких материалов при их гофрировании. При прочих равных условиях гофрированные минераловатные изделия характеризуются большей (в 2...2,5 раза) прочностью при сжатии, чем изделия с горизонтально ориентированными волокнами. Применение этих изделий существенно повышает надежность теплоизоляционных конструкций.

Способ прошел широкую промышленную проверку на ряде заводов. В 1986 г. промышленный выпуск гофрированных минераловатных изделий составил 180 тыс. м³.

Принципиальная схема технологической линии приведена на рис. 7.35. Изделия на этой линии могут выпускаться без упрочняющего слоя, с упрочняющим слоем и последующей обклейкой гидроизоляционным или отделочным материалом.

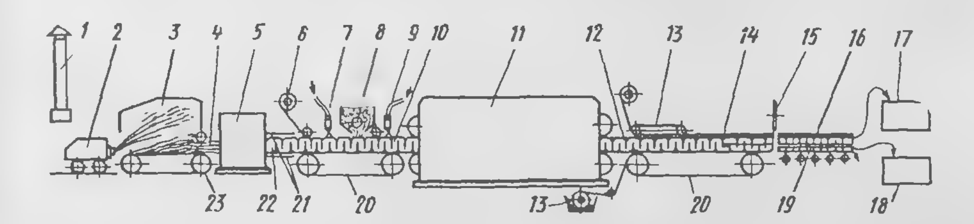


Рис. 7.35. Схема поточного производства упрочненных минераловатных изделий гофрированной структуры:

1 — плавильный агрегат; *2* — узел волокнообразования; *3* — камера волокноосаждения; *4* — минераловатный ковер горизонтальной слоистости; *5* — узел гофрирования; *6* — узел армирования; *7, 9* — узлы нанесения раствора связующего; *8* — узел нанесения выравнивающего слоя; *10* — ковер до тепловой обработки; *11* — камера тепловой обработки; *12* — лента отвержденного ковра; *13* — узел наклейки изоляционных (отделочных) слоев; *14* — нож послойной резки; *15* — ножи поперечной и продольной резки; *16* — упрочненное изделие; *17, 18* — контейнеры готовой продукции; *19* — изделие без упрочнения; *20* — приемный транспортер; *21* — направляющие; *22* — ковер гофрированной структуры; *23* — подающий транспортер

В качестве упрочняющего слоя, который наносится на верхнюю поверхность изделия толщиной 5...7 мм, используют отходы минераловатного производства и раствор связующего. При этом общий расход связующего (5...7% по массе), принятый для неупрочненных изделий, сохраняется и при нанесении упрочняющего слоя. В этом случае 65...80% связующего вводят в минераловатный ковер в камере волокноосаждения, а 20...35% идет на упрочняющий слой.

Обкладочные материалы приклеивают к упрочняющему слою после отверждения связующего мастикой.

Гофрирование ковра осуществляется в автоматическом режиме с помощью гофрировщика, устанавливаемого между камерами волокноосаждения и тепловой обработки. Ковер с введенным в него раствором связующего уплотняется и поступает на гофрирование, которое осуществляется при прохождении ковра между двумя синхронно вращающимися барабанами с лопастями. Затем он подпрессовывается и направляется в камеру тепловой обработки. По производительности и качеству получаемых изделий эта технология весьма эффективна и должна получить широкое применение.

Большое значение для расширения областей применения минеральной ваты и минераловатных изделий имеет повышение тем-

пературостойкости как самой минеральной ваты, так и связующих, а также создание щелочестойких волокон, для использования в качестве армирующих элементов в бетонах.

Все перечисленные выше задачи справедливы и для стекловолокна.

ГЛАВА 8

МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ ИЗ ПОРИЗОВАННЫХ ИСКУССТВЕННЫХ СТЕКОЛ

Искусственные стекла (стеклобой, стекольный гранулят, жидкое стекло) являются хорошим сырьем для получения эффективных теплоизоляционных материалов и изделий, некоторые из них обладают высокой коррозионной стойкостью, водо- и морозостойкостью, что позволяет использовать эти материалы в агрессивных средах.

8.1. Ячеистое стекло (пеностекло)

Ячеистое стекло — высокопористый теплоизоляционный материал ячеистой структуры, в котором равномерно распределенные поры разделены тонкими перегородками из стекловидного вещества. Свое второе название — *пеностекло* — материал получил благодаря внешнему виду, напоминающему застывшую пену.

Известно несколько способов получения ячеистого стекла: введение в состав шихты веществ, обильно выделяющих газообразные продукты в процессе варки стекла; продувание стекольного расплава воздухом или газами; вспучивание размягченного стекла под вакуумом в результате расширения воздуха, содержащегося в стекломассе; смешивание тонкодисперсного стекольного порошка с технической пеной и последующее закрепление пористой структуры стекломассы спеканием; спекание смеси, состоящей из порошкообразного стекла и газообразователя (порошковый способ).

В отечественной практике получил применение порошковый способ, который позволяет направленно регулировать свойства ячеистого стекла в широких пределах.

Виды и свойства ячеистого стекла: изоляционно-строительное, используемое для утепления ограждающих конструкций зданий; изоляционно-монтажное, применяющееся для изоляции установок глубокого и умеренного холода, промышленного оборудования и теплопроводов с рабочей температурой до 400 °С; влагозащитное, характеризующееся водопоглощением за 360 сут не более 1,8% по объему; специального назначения (бесщелочное и высококремнеземистое, применяющееся для тепло- и электроизоляции приборов и аппаратов и характеризующееся высокой

прочностью, термостойкостью, радиопрозрачностью (температура применения — до 600 °С для бесщелочного ячеистого стекла и до 1200 °С для высококремнеземистого); декоративно-акустическое (звукопоглощающее); фильтрующее, характеризующееся мелкой сообщающей пористостью.

Если два последних вида ячеистого стекла должны иметь открытую сообщающуюся пористость, то при производстве всех остальных видов стремятся получать мелкопористую структуру с замкнутыми равномерно распределенными порами.

В табл. 8.1 приведены основные свойства некоторых видов ячеистого стекла.

Таблица 8.1. **Виды и основные свойства ячеистого стекла**

Показатель	Виды ячеистого стекла			
	изоляционно-строительное	изоляционно-монтажное	бесщелочное	влагозащитное
Средняя плотность	150 ... 250	130 ... 160	350 ... 500	140 ... 180
Теплопроводность при 20°С, Вт/(м·°С)	0,06 ... 0,087	0,055 ... 0,07	0,1 ... 0,125	0,06 ... 0,07
Прочность, МПа:				
при сжатии	0,8 ... 2,0	0,5 ... 0,8	3 ... 5	0,6 ... 0,9
при изгибе	0,5 ... 1,0	0,3 ... 0,4	1,0 ... 1,5	0,4 ... 0,6
Допустимая температура применения, °С	400	От 400 до —160	600	—

Характер пористой структуры ячеистого стекла направленно изменяют путем корректировки химического состава сырья, подбора газообразователя, его дисперсности и расхода, а также путем изменения режима спекания, влияя на интенсивность газообразования и реологические свойства (вязкость) поризуемой стекломассы.

Для получения равномерно распределенной пористости необходимым условием является равномерное распределение газообразователя в объеме исходной шихты.

Средняя плотность ячеистого стекла регулируется изменением температуры и продолжительности вспенивания, подбором газообразователя, степенью дисперсности порошков стекла и газообразователя. Зависимость средней плотности от температуры вспенивания для различных газообразователей и от продолжительности вспенивания, а также от дисперсности шихты приведена на рис. 8.1, *а, б, в*.

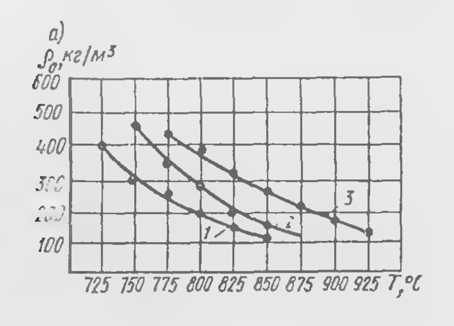
Изменяя технологические параметры, можно получать ячеистое стекло со средней плотностью от 130 до 800 кг/м³.

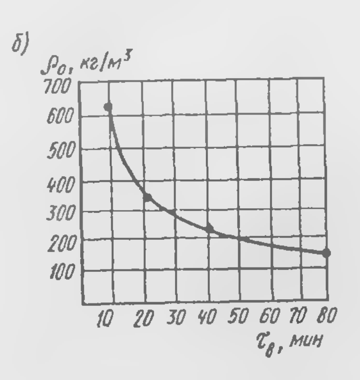
Прочность ячеистого стекла значительно выше, чем любого другого ячеистого материала из неорганического сырья. Например, у ячеистого стекла и ячеистого бетона марки 300 коэффициенты конструктивного качества соответственно равны 10 и 3,3. Это объясняется более высокой плотностью и прочностью меж-

поровых перегородок, сформированных из стекла. Зависимость прочности при сжатии ($R_{сж}$) ячеистого стекла от средней плотности ($\rho_{ср}$) в пределах 150...700 кг/м³ может быть выражена формулой, МПа:

$$R_{сж}=(0{,}2\rho_{ср}-20)\,0{,}1. \qquad (8.1)$$

Водопоглощение ячеистого стекла зависит в основном от характера его пористой структуры: оно достигает 70...80% (по объ-





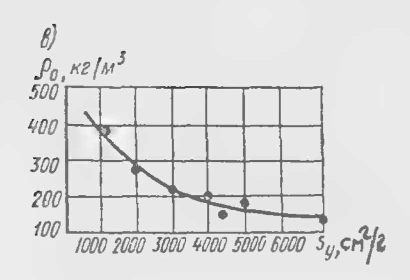


Рис. 8.1. Зависимость средней плотности пеностекла:

а — от температуры вспенивания $T_в$ при различных газообразователях; *б* — от продолжительности вспенивания $\tau_в$; *в* — от удельной поверхности шихты S_y; *1* — антрацит; *2* — сажа; *3* — кокс

ему) у материала с сообщающейся пористостью и 1...10% с замкнутой пористостью. Стойкость ячеистого стекла по отношению к длительному воздействию воды велика и определяется гидролитическим классом стекла. Гигроскопичность очень мала и исчисляется долями процента по объему.

Морозостойкость ячеистого стекла высока, если его поверхность защищена от увлажнения и, следовательно, от последующего деструктивного воздействия льда в поверхностных открытых порах.

Теплопроводность ячеистого стекла относительно невысока — 0,055...0,085 Вт/(м·°С). Этому способствуют стеклообразное строение межпоровых перегородок, замкнутые мелкие поры изоляционно-строительного и изоляционно-монтажного ячеистого стекла.

Все виды ячеистого стекла характеризуются высокой биостойкостью. Материал легко поддается механической обработке (пилению, шлифовке, сверлению и т. п.).

Физико-химические основы порошкового способа производства изделий из ячеистого стекла заключаются в достижении соответствия между температурами перехода стекла в пиропластическое состояние и начала активного газообразования.

Технология изделий из ячеистого стекла, основанная на порошковом способе, предусматривает приготовление тонкодисперсной шихты, состоящей из порошков стекла и газообразователя, спекания шихты с одновременной ее поризацией, закрепление полученной пористой структуры и снятие температурных напряжений, возникающих в массиве изделия при изменении температуры.

Тонкая диспергация шихты (S_y=4000...5500 см²/г) предопределяет качество пористой структуры (чем тоньше помол компонентов, тем мельче пористость) и влияет на продолжительность спекания и газообразования (чем большая дисперсность шихты, тем быстрее протекают эти процессы).

Наиболее ответственным технологическим процессом является спекание и поризация материала. В это время протекает ряд физических и физико-химических процессов, требующих сочетания важнейших факторов, определяющих заданную направленность структурообразования. При температуре интенсивного газообразования стекломасса должна характеризоваться достаточной вязкостью, обеспечивающей неразрывность образующихся пленок (межпоровых перегородок) и низким поверхностным натяжением, способствующим утончению этих пленок. Это соответствие обеспечивается температурой начала активного газовыделения (видом газообразователя) и химическим составом стекломассы, определяющим изменение ее реологических свойств при нагревании.

Практика показывает, что основные факторы, влияющие на устойчивость процесса вспучивания стекломассы, в своем количественном выражении должны находиться примерно в следующих пределах: вязкость стекломассы при температуре ее вспучивания (720...930 °С) 2800...3500 Па·с; поверхностное натяжение должно быть близким к значению 3,5...10⁻³ Н/м, парциальное давление газовой фазы с повышением температуры должно нарастать начиная с температуры на 50...70 °С выше температуры размягчения стекла, причем давление газовой фазы должно нарастать постепенно в широком интервале температур, совпадающем с температурным интервалом, обеспечивающим рабочую вязкость стекломассы.

При вспучивании стекломассы протекают различные процессы физического и физико-химического характера. *Физическим процессом* является размягчение частиц стекла; для большинства стекол это происходит при температуре 600 °С. Вязкость стекла при этом велика и вспучивания практически не происходит. При дальнейшем повышении температуры снижается вязкость стекла и наблюдается спекание частиц (образование стекломассы) при некотором снижении объема — *процесс физико-химический.* При

повышении температуры выше температуры начала размягчения стекольного порошка на 50...70 °С в случае использования углеродсодержащего газообразователя идут химические реакции между сульфатом натрия, который содержится в стекле, и углеродом:

$$Na_2SO_4 + 4C = Na_2S + 4CO \quad (8.2)$$

Дальнейшее повышение температуры интенсифицирует эту реакцию и одновременно снижает вязкость стекломассы, что приводит к ее вспучиванию за счет увеличения газовой фазы. Наряду с этой реакцией происходит окисление углерода по схемам:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \nearrow; \quad 2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2 \nearrow \quad (8.3)$$

При недостатке кислорода идет реакция восстановления с поглощением теплоты:

$$CO_2 + C \rightarrow 2CO \nearrow$$

В качестве углеродсодержащих газообразователей в промышленности применяют кокс, полукокс, антрацит, графит, карбид кремния.

С целью регулирования свойств ячеистого стекла и его пористой структуры применяют в качестве газообразователя карбонатные породы (известняк, мрамор). В этом случае образование газовой фазы обеспечивается реакциями:

замещения

$$CaCO_3 + SiO_2 = CaSiO_3 + CO_2 \nearrow \quad (8.4)$$

которая идет от 600 °С,

разложения

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \nearrow \quad (8.5)$$

которая начинается при температурах 795...818 °С.

Используют и некоторые другие газообразователи, основные виды которых приведены в табл. 8.2.

Таким образом, изменяя химический состав стекла, тонкость его помола, применяя различные виды газообразователей, направленно регулируя режим спекания, можно в широких пределах изменять общую пористость, ее характер и, следовательно, свойства изделий из ячеистого стекла.

Весьма важным моментом в технологии ячеистого стекла является бездефектное закрепление пористой структуры ячеистого стекла. Это достигается применением специальных режимов охлаждения вспученной массы. Для предотвращения осадки вспученной стекломассы в первый период, когда она находится в пиропластическом состоянии и нет опасности трещинообразования, резко повышают ее вязкость путем снижения температуры на 150...180 °С. Затем применяют медленный режим охлаждения (отжиг) с целью перевода стекла в твердое состояние и недопущения при этом термических напряжений, могущих привести к растрескиванию изделий.

Таблица 8.2. Виды газообразователей, применяемых в производстве ячеистого стекла

Газообразователь	Температура спекания, °С	Необходимое количество газообразователя, % по массе	Строение пор ячеистого стекла	Цвет ячеистого стекла
Пиролюзит (MnO_2)	680 ... 720	3,0 ... 5,0	Частично замкнутые	Фиолетовый
Азотокислый натрий ($NaNO_3$)	720	3,0 ... 5,0	Сообщающиеся	Белый, серый
Известняк, мрамор ($CaCO_3$)	760 ... 775	0,5 ... 1,0	Преимущественно сообщающиеся	Белый
Карбид кальция	750 ... 760	1,0 ... 1,5	Преимущественно замкнутые	—
Антрацит	770 ... 780	2,0 ... 3,0	Частично сообщающиеся	Табачно-желтый, темно-серый
Кокс	790 ... 800	2,0 ... 3,0	Замкнутые	Коричневый до черного
Графит	850 ... 900	1,0 ... 2,0	»	Серый, черный
Карбид кремния (SiC)	850 ... 900	1,0 ... 3,0	»	Серый

Сырье для производства изделий из ячеистого стекла весьма разнообразно. В качестве сырья могут быть использованы следующие материалы: отходы стекольного производства; бой оконного или тарного стекла; гранулят из специального сваренного стекла; легкоплавкие горные породы, содержащие щелочи.

Использование боя стекла вследствие неоднородности его химического состава создает существенные трудности для получения ячеистого стекла со стабильными заданными свойствами. Высококачественное ячеистое стекло получают из гранулята специально сваренного стекла. Однако при этом требуются более дорогостоящие и дефицитные материалы. Снижение стоимости гранулята достигают путем замены кальцинированной соды и глинозема дешевыми щелочесодержащими горными породами и отходами производства — нефелинами, перлитами, андезитами, вулканическими пеплами, легкоплавкими озерными глинами, золами ТЭС и др.

Хорошими свойствами обладают стекла, содержащие в своем составе, % по массе: SiO_2 — 60...72,5; Fe_2O_3 — 0...2,5; CaO — 4,5...6,0; MgO — 1,5...2,5; Na_2O — 12,5...15,0.

Газообразователи должны отвечать следующим основным требованиям: температура выделения газа должна быть на 50...70 °С выше температуры начала размягчения стекольного порошка; выделение газа должно происходить равномерно в количестве,

обеспечивающем необходимое парциальное давление; не должны выделять токсичных продуктов; не быть дефицитными и дорогостоящими. В табл. 8.2 приведены виды газообразователей, наиболее широко применяющихся при производстве изделий из ячеистого стекла.

Выбор вида газообразователя зависит от температуры спекания и интервала вязкости стекла, от требуемого вида пористости и в некоторых случаях окраски изделий.

Технология изделий из ячеистого стекла имеет разновидности. При использовании стеклобоя процесс изготовления изделий осуществляется по неполной технологической схеме. В этом случае отсутствуют стекловаренная печь и обслуживающее ее отделение подготовки шихты. Технологический процесс начинается с отделения очистки и дробления стеклобоя.

Однако большинство заводов работает по полной технологической схеме, которая включает отделение подготовки сырья для получения стеклогранулята, отделение приготовления шихты, стекловаренную печь, отделение грануляции стекла, представляющее собой сетчатый конвейер, орошаемый водой, на который из летки выработочной части печи поступает стекольный расплав. За счет обильного орошения водой расплав быстро остывает, распадаясь на отдельные гранулы. Стекольные гранулы и газообразователь поступают в следующее отделение подготовки шихты для получения ячеистого стекла. Здесь гранулят и газообразователь подвергают дроблению в щековых или молотковых дробилках до частиц размером 1...3 мм и после дозирования они поступают на совместный помол в двухкамерную шаровую мельницу непрерывного действия с керамической или кремниевой футеровкой и кремниевыми мелющими телами. Помол производят до получения продукта с $S_у$ от 4000 до 7000 см²/г.

Дальнейшие технологические операции: вспучивание стекломассы и отжиг (охлаждение) изделий производят либо в одной печи (одностадийный способ), либо в разных печах — печи вспучивания (вспенивания) стекломассы и печи отжига изделий (двустадийный способ).

При одностадийном способе формы из жаростойкой стали или чугуна, наполненные шихтой, устанавливают на вагонетки, которые поступают в туннельную печь, работающую по принципу прямотока. В этом случае тепловую обработку осуществляют по режиму, вариант которого приведен на рис. 8.2.

При двустадийном способе формы с шихтой поступают в печь вспенивания, где они нагреваются до температуры, обеспечивающей получение пористой структуры стекломассы, и затем достаточно быстро охлаждаются до температуры 600...630 °С с целью повышения вязкости стекломассы и фиксации полученной пористой структуры. Примерный режим работы печи вспенивания приведен на рис. 8.3. По выходе из печи блоки из ячеистого стекла извлекают из форм и направляют в печь отжига (лер) конвейерного типа, в которой они охлаждаются в течение 10...12 ч по режиму, приведенному на рис. 8.4. Установку блоков на сетчатый конвейер производят на ребро. Для обеспечения заданного режима отжига необходима принудительная циркуляция теплоносителя, что обеспечивается установкой вентиляционных систем.

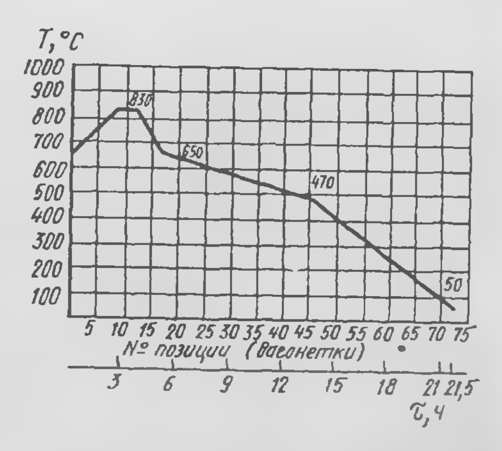


Рис. 8.2. Режим термической обработки пеностекла в туннельной печи

В промышленности осваивается конвейерный способ производства блоков из ячеистого стекла (рис. 8.5). В этом случае шихта подается на конвейер, выполненный из жаростойких элементов в виде поддонов с боковыми бортами. Поддоны соединены между собой встык и образуют желоб. По мере продвижения желоба вдоль печи, что обеспечивается специальным толкателем, шихта нагревается и, вспениваясь, образует ленту ячеистого стекла, выравнивание верхней поверхности которой осуществляется специальными валиками. На выходе из печи, после стабилизации пористой структуры (после охлаждения до 600 °С), лента пеностекла дисковыми пилами разрезается на плиты заданных размеров (по размеру поддонов), которые автоматически перегружаются в печь отжига. После окончания тепловой обработки плиты калибруются и направляются на склад готовой продукции.

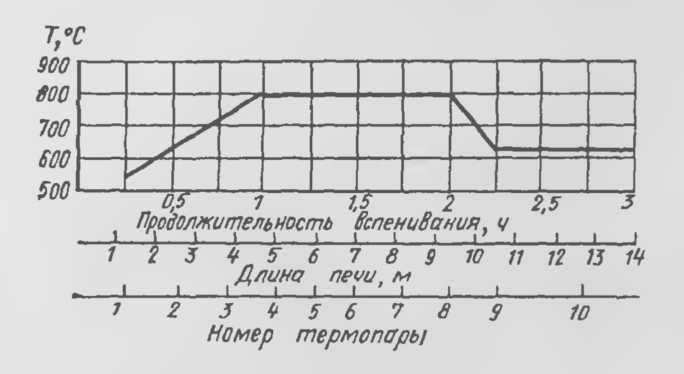


Рис. 8.3. Режим вспенивания пеностекла

Практика показала, что двустадийный способ позволяет получать изделия более высокого качества. Он менее металлоемок

и легче поддается механизации и автоматизации, особенно конвейерный. Дальнейшее развитие производства, очевидно, должно идти по пути создания высокопроизводительных автоматизиро-

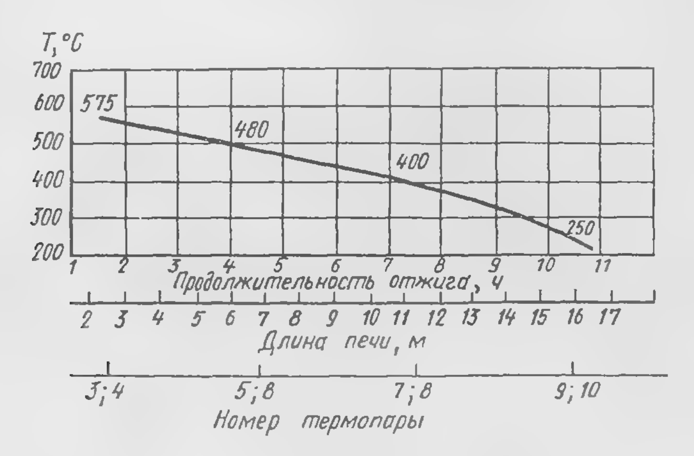


Рис. 8.4. Режим отжига пеностекла

ванных линий. Немаловажным фактором, сдерживающим увеличение объема выпуска этого весьма эффективного материала, является дефицитность и высокая стоимость сырья. Поэтому по-

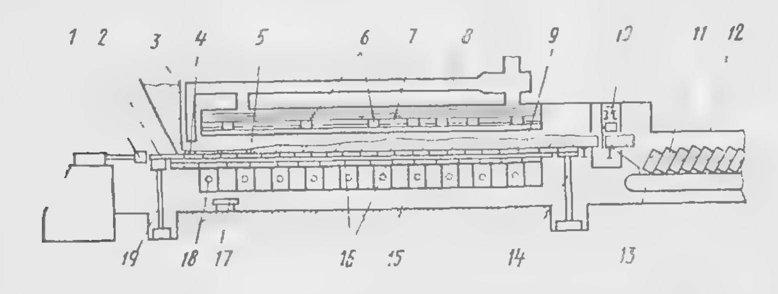


Рис. 8.5. Схема конвейерной установки:

1 — толкатель форм; *2* — поддон; *3* — бункер для шихты; *4* — направляющие для поддонов; *5* — рабочий канал печи; *6* — канал для отсоса дымовых газов; *7* — верхний топочный канал; *8* — коллектор для отсоса дымовых газов; *9* — лента пеностекла; *10* — отрезное устройство; *11* — блоки пеностекла; *12* — печь отжига; *13* — конвейер печи отжига; *14* — снижатель поддонов; *15* — туннель для возврата поддонов; *16* — шпалы из жаростойкой стали; *17* — тележка; *18* — горелка; *19* — приемник поддонов

иск путей замены этого сырья дешевыми и недефицитными материалами, в том числе отходами и побочными продуктами других отраслей промышленности, является важной народнохозяйственной задачей.

8.2. Материалы на основе вспученного жидкого стекла

Это группа высокопористых материалов является продуктом термического или химического вспучивания гидратированного растворимого стекла (гидратированных щелочных силикатов). Их можно классифицировать по следующим принципам: природе структурообразующих элементов изделий, принципу вспучивания, фракционному составу и эксплуатационным свойствам.

Различают вспученные жидкостекольные материалы, представляющие собой продукты вспучивания гидратированных растворимых стекол, и композиционные материалы, включающие гранулированное вспученное жидкое стекло и связующее. По природе вспучивания жидкостекольные материалы разделяются на термовспученные и вспученные в результате химического взаимодействия между стеклом и специально введенным в него веществом.

К термовспученным материалам относят зернистые, а также обжиговые монолитные материалы. К вспученным химическим путем — заливочные композиции, в которые вводят газообразующий компонент.

Зернистые материалы в зависимости от гранулометрического состава подразделяют на крупнозернистый (стеклопор) с размером зерен более 5 мм и мелкозернистый (силипор) — от 0,1 до 5 мм.

Основным различием эксплуатационных свойств материалов на основе жидкого стекла является их отношение к действию воды. Различают неводостойкие материалы, эксплуатация которых возможна при относительной влажности воздуха до 75 °С, и материалы с повышенной водостойкостью, способные длительное время выдерживать действие воды.

Композиционные материалы, изготовляемые в виде изделий на основе зернистых продуктов, в зависимости от заполнения межзерновой пустотности связующими веществами делят на материалы с контактным и объемным омоноличиванием. Особой формой композиционных материалов следует считать сотопластовые изделия, представляющие собой сотопластовый каркас из бумаги или ткани, пропитанных специальными растворами, заполненный мелкодисперсным зерновым материалом из вспученного жидкого стекла, например силипором.

К достоинствам этих материалов следует отнести простоту и малую энергоемкость технологии, высокие теплоизоляционные свойства [λ силипора — 0,028...0,035 Вт/(м·°С), а стеклопора и изделий на его основе не превышает 0,065 Вт/(м·°С)], низкую среднюю плотность (от 10...60 кг/м^3 для зернистых материалов, до 200 кг/м^3 для композиционных изделий), негорючесть.

К недостаткам, сдерживающим развитие производства материалов на основе вспученного жидкого стекла, относятся ограни-

ченная водостойкость и дефицитность гидратированных натриевых силикатов.

Придание рассматриваемым материалам высокой водостойкости возможно (такие исследования выполнены в МИСИ им. В. В. Куйбышева), однако это связано с существенным удорожанием продукции, повышением средней плотности и теплопроводности материалов.

Следует продолжить поиск более эффективных путей повышения водостойкости с целью расширения областей применения этих материалов.

Технология вспученных материалов из жидкого стекла имеет три разновидности. Технологический процесс получения *гранулированного материала* (стеклопора) состоит из следующих основных операций: приготовления смеси из раствора жидкого стекла и технологических добавок; частичной дегидратации полученной смеси; диспергирования (грануляции) смеси и вспучивания гранулята.

Сырьем для производства таких материалов служат: натриевое жидкое стекло, тонкомолотые минеральные наполнители и специальные добавки. Тонкомолотые минеральные наполнители, в качестве которых можно с успехом использовать мел, известняк, песок, тальк, маршалит, оксид алюминия, каолин, асбестовую пыль, трепел, перлит, золы ТЭС и многие отходы химического производства, предназначены для регулирования реологических характеристик смеси (ее отощения) и повышения прочности готовых гранул.

Специальные добавки предназначены для направленного регулирования эксплуатационных свойств материала. В зависимости от эффекта, получаемого от их введения, эти добавки можно разделить на упрочняющие, гидрофобизирующие, повышающие водостойкость и вспучиваемость материала.

В исходную жидкостекольную смесь входят 93...95% жидкого стекла плотностью 1,4...1,45 г/см³; 7...5% тонкодисперсного наполнителя с удельной поверхностью 2000...3000 см²/г и 0,5...1,0% гидрофобизирующей добавки — кремнийорганической жидкости ГКЖ-94, ГКЖ-10 или ГКЖ-11.

Схема технологического процесса получения стеклопора приведена на рис. 8.6. Смесь готовится в двух смесителях вертикального типа *1*. После достижения однородности она перекачивается в расходный бак *3* гранулятора *4* и через фильерную пластину *2* самотеком в виде капель поступает в ванну гранулятора, заполненную раствором хлорида кальция плотностью 1,29...1,35 г/см³. Попадая в раствор хлорида кальция, капли образуют гранулы (бисер) с упрочненным поверхностным слоем, представляющим собой кремнегель, содержащий адсорбированный оксид кальция. Образовавшиеся гранулы оседают на сетку конвейера и выносятся ею в приемное устройство гранулятора, из которого непрерывным потоком через пересыпное устройство попадают в сушильный

барабан *5*. Упрочнение верхнего слоя гранул в растворе хлорида кальция происходит во времени и зависит от температуры раствора. Оптимальным параметром формирования гранул с прочным поверхностным слоем является 40-минутное пребывание их в растворе хлорида кальция, что обеспечивается определенной скоростью движения сетки конвейера, при температуре раствора, равной 22 ... 30°С. Для поддержания температуры раствора хлорида кальция в заданных пределах ванну гранулятора оборудуют нагревателем — паровым змеевиком.

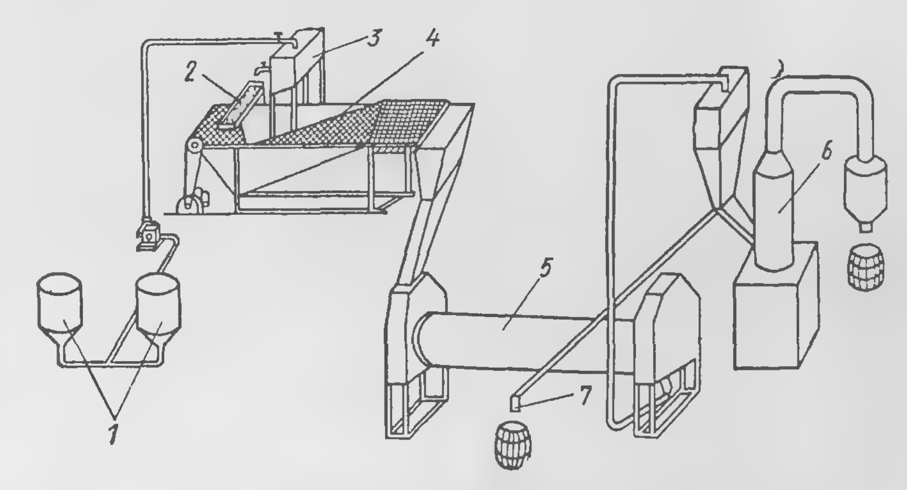


Рис. 8.6. Технологическая схема получения стеклопора

В сушильном барабане гранулы высушиваются при температуре 85...90 °С в течение 20...10 мин до влажности 27...30% и поступают по трубопроводу к месту затаривания *7* для отправки потребителю или в расходный бункер печи кипящего слоя *6* для вспучивания, которое осуществляется при температуре 350...500 °С в течение 1...3 мин. Полученный продукт поступает на дальнейшую переработку в изделия либо затаривается в полиэтиленовые мешки и отправляется потребителю.

В качестве теплового агрегата можно использовать вращающуюся печь с теми же параметрами тепловой обработки.

При получении силипора (материала с гранулами менее 5 мм) грануляция жидкостекольной смеси осуществляется путем ее распыления в башенной сушилке. В этом случае грануляция и вспучивание совмещаются в одной операции. Вспучивание гранулята происходит за счет испарения содержащейся в жидком стекле связанной воды в момент перехода материала в пиропластическое состояние. Температура размягчения растворимого стекла тем ниже, чем больше воды в нем содержится. Однако чрезмерное содержание воды (более 40%) во вспучиваемых гранулах

приводит к их растрескиванию или к образованию крупных пор с тонкими непрочными перегородками.

Кроме гранулированного материала освоено производство *штучных изделий* в виде плит размером 500×500(1000)×70... 100 мм. Технология таких изделий также проста и отличается тем, что смесь из жидкого стекла, минерального наполнителя и специальных добавок вспучивается в формах при тепловой обработке. Стабилизация пористой структуры осуществляется при постепенном охлаждении. Для повышения прочностных показателей изделий и снижения опасности трещинообразования при их изготовлении в формовочные смеси следует вводить пористые заполнители (вспученные перлит или вермикулит).

Технология изделий из гранулированного вспученного жидкого стекла (стеклопора) заключается в подготовке связующего, приготовлении формовочной массы из стеклопора и связующего, формовании изделий и создании условий для скорейшего отверждения связующего. Введение связующего в формовочную смесь можно производить одним из известных способов: приготовлением гидромасс в мешалках периодического действия, проливом гранул в форме с перфорированным днищем или способом распыления непосредственно при укладке стеклопора в форму.

На Рязанском картонно-рубероидном заводе освоено производство теплоизоляционных изделий из стеклопора на битумном связующем. Разработаны составы и определены технологические параметры производства изделий на гипсовом, цементном, полимерном связующих (табл. 8.3).

Таблица 8.3. Характеристика изделий на основе стеклопора

Вид изделия	Вид связующего	Расход связующего на 1 м³, кг	Средняя плотность изделий, кг/м³	Прочность при сжатии, МПа
Стеклогипс	Гипс	55 ... 80	130 ... 250	0,1 ... 0,3
Стеклосиликат	Жидкое стекло	50 ... 80	80 ... 200	0,15 ... 0,4
Стеклобитум	Расплавленный битум БН-IV	50 ... 75	120 ... 200	0,15 ... 0,3
Стеклоцемент	Цементное молоко	55 ... 70	120 ... 200	0,15 ... 0,3
Стеклополимер	Термопласты	30 ... 40	70 ... 110	0,15 ... 0,7

Несмотря на дефицитность жидкого стекла, следует считать материалы на его основе перспективными, особенно в сочетании с пенопластами, когда средняя плотность пенопласта соизмерима со средней плотностью гранул стеклопора. В этом случае достигается максимальный эффект. Материалы на битумном связующем помимо невысокой средней плотности водостойки за счет битума и могут применяться в наружной теплоизоляции под мягкой кровлей.

ГЛАВА 9

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ ИЗ ВСПУЧЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД И МИНЕРАЛОВ

Гидратированные горные породы (вулканические кислые стекла, слюды) способны вспучиваться при нагревании за счет перехода содержащейся в них воды из твердой в газообразную фазу. В данной главе рассматривается производство высокопористых материалов зернистого строения из перлитовых горных пород и вермикулитизированных слюд, получившее наиболее широкое распространение.

9.1. Вспученный перлит и изделия из него

Вспученный перлит представляет собой сыпучий теплоизоляционный материал в виде пористых зерен преимущественно светлой окраски.

Важнейшим направлением технического прогресса в строительстве является повышение заводской готовности и качества конструкций, снижение массы зданий и сооружений на базе использования новых эффективных материалов. Одним из таких материалов является вспученный перлит, широкое промышленное производство которого налажено в послевоенные годы. По данным института «ВНИИТеплоизоляция», в 1985 г. было произведено более 550 тыс. м³ теплоизоляционных перлитовых изделий. Высокие теплоизоляционные свойства вспученного перлита обеспечивают возможность получения на его основе целой группы теплоизоляционных изделий, применение которых по температурным областям подразделяют на три группы: для отрицательных температур и глубокого холода (до —200 °С) — перлитобитумные плиты, битумноперлитовая масса; для средних положительных температур (до 600 °С) — перлитоцементные, перлитогелевые изделия; для высоких температур (до 1200 °С) — керамоперлитовые изделия, жаростойкие бетоны и легковесные огнеупоры, в которых вспученный перлит применяют в качестве облегчающей добавки.

Кроме того, вспученный перлит используют в качестве наполнителя акустических штукатурок, как фильтрующую среду и сорбент, как водоудерживающий и улучшающий структуру почвы элемент (агроперлит).

Потребителями вспученного перлита стали: гражданское и промышленное строительство, металлургия и литейное производство, химическая и пищевая промышленность, энергетика, сельское хозяйство и другие отрасли народного хозяйства.

Получают вспученный перлит путем измельчения до нужной фракции и обжига водосодержащих горных пород вулканического происхождения — вулканических стекол. Они образовались в

результате выноса из недр земли в виде лавы природного кислого магматического расплава.

На образование вулканических стекол решающее влияние оказывают химический состав и скорость остывания лавы. В лавах, богатых кремнеземом, при охлаждении быстро нарастает вязкость, которая становится значительной уже при относительно высоких температурах. Это предотвращает кристаллизацию, и лава, застывая, превращается в стекловидное вещество. Чем быстрее происходит охлаждение излившейся лавы, тем меньше степень ее закристаллизованности и тем большей потенциальной энергией обладает вещество. Свойства вулканических стекол зависят также и от последующих изменений энергетического характера. Чаще всего происходит их гидратация. От возраста стекол зависит степень их гидратации и, следовательно, содержание летучих веществ. В основном летучими компонентами, производящими работу по вспучиванию стекол при их нагревании, является первичная вода, входившая в состав магмы, и вода, приобретенная в процессе гидратации твердого стекла — вторичная вода.

В зависимости от содержания воды вулканические стекла разделяют на обсидианы (до 1% воды), перлиты (1...6%), пехштейны, витрофиры и др. (более 6%).

В производстве вспученного перлита все применяемые в качестве сырья вулканические породы (с 1...10% п.п.п.) принято называть перлитом. Химический состав перлита различных месторождений колеблется в следующих пределах, % по массе: SiO_2 — 70...75; Al_2O_3 — 2,5...9; Fe_2O_3 — 0,2...4; $CaO+MgO$ — 0,3...6; H_2O — 0,3...10; 3...9 Na_2O+K_2O.

Виды и свойства вспученного перлита определяются гранулометрией исходного сырья, его генезисом, водосодержанием и режимами тепловой обработки. Промышленность производит вспученный перлит двух видов: перлитовый песок (размер частиц до 5 мм) и перлитовый щебень (от 5 до 20 мм), который сам по себе не является теплоизоляционным материалом, а применяется в качестве пористого заполнителя при производстве легких бетонов. В связи с этим технология перлитового щебня в данном курсе не рассматривается.

В соответствии со стандартом вспученный перлитовый песок имеет марки от 75 до 500 и теплопроводность — от 0,047 до 0,093 Вт/(м·°С). Перлитовый песок, используемый для теплоизоляции, имеет насыпную плотность от 80 до 120 кг/м³; более тяжелый песок ($\rho_н$=150...300 кг/м³) применяют в качестве мелкого заполнителя в легких бетонах.

Вспученный перлитовый песок характеризуется высокопористой структурой; общая пористость, включая межзерновые пустоты, составляет 90...98%. Внутризерновые поры имеют сферическую и щелевидную форму, их размер колеблется от 0,5 до 10 мкм. Обычно объем замкнутых пор составляет не более 25%.

Вспученный перлит огнестоек, химически инертен, биостоек и не имеет запаха.

Водопоглощение и гигроскопичность вспученного перлита весьма высокие, что объясняется высокопористой структурой и большой открытой гидрофильной поверхностью. Он активно сорбирует пары воды. Водопоглощение и сорбционная способность вспученного перлита существенно зависят от размера частиц и увеличиваются с повышением их дисперсности. Например, при размере зерен более 2 мм водопоглощение достигает 30% по объему (около 300% по массе), для зерен размером 0,25...0,5 мм возрастает до 60% (800...900% по массе).

Теплопроводность вспученного перлита зависит от фор[...] гранулометрии частиц, размеров и расположения пор, темпе[...]ры среды и влажности материала.

Наименьшей теплопроводностью в обычных условиях характеризуется перлитовый песок фракций 0,1...0,6 мм. Содержание их в рядовом песке составляет в среднем 50% по массе. Такой песок наиболее пригоден для порошковой теплоизоляции.

Наиболее существенное влияние на теплопроводность перлитового песка оказывает влажность. Теплопроводность при влажности 10% увеличивается в 2 раза, а при 80% — в 3...4 раза.

Следует также отметить, что увлажненный перлитовый песок трудно подвергается сушке (особенно мелкие фракции); процесс этот длителен и требует значительных затрат теплоты. Поэтому в условиях эксплуатации теплоизоляцию из вспученного перлита необходимо надежно защищать от увлажнения. Применение способов переработки вспученного перлита в изделия, связанных с его значительным увлажнением, также нерационально из-за высоких затрат теплоты, потребной для сушки изделий.

Наиболее эффективный способ защиты материалов от увлажнения — их гидрофобизация кремнийорганическими соединениями, которые не изменяют цвета и фактуры, не снижают теплоизоляционных свойств и прочно удерживаются на поверхности.

Сырьевые ресурсы перлитов весьма значительны. Вспучивающиеся перлитовые породы имеются в Закавказье, Забайкалье и Закарпатье, а также в Приморском крае, в Юго-Восточном Казахстане. Одним из крупнейших месторождений высококачественного перлитового сырья является Армянское нагорье. Особенно выделяется здесь широко разрабатываемое Арагацкое месторождение. Оно имеет большую протяженность, доступно для разработки широким фронтом. Перлиты этого месторождения хорошо вспучиваются и характеризуются низкой насыпной плотностью — от 40 до 100 кг/м³.

Закарпатье — второй в СССР крупный район размещения перлитового сырья. Здесь наиболее высокими свойствами обладают перлиты Береговского Холмогорья.

Крупные месторождения перлита имеются в Венгрии, США, Италии, Африке, Северной Ирландии.

Вспучивание перлитовых пород заключается в совмещении процессов испарения находящейся в них трудноудаляемой связанной воды с переходом вещества породы из твердого в пиропластическое состояние. Порообразователем в данном случае служит вода, которая, переходя из твердого в парообразное состояние при температуре 900...950 °С, увеличивается в объеме в 4000 раз.

Отдельные разновидности водосодержащих вулканических стекол по химическому составу близки между собой, отличаясь в основном содержанием воды и формой ее связи. Характер связи воды со стеклом зависит от условий (температуры и давления), при которых она образовывалась в стекле при его формировании. Во всех случаях вода находится в вулканических стеклах в виде молекулярной воды H_2O и гидроксила OH^-. Перлиты, образованные при невысоких давлениях, содержат главным образом низкотемпературную молекулярную воду. При возрастании давления содержание в них прочно связанного гидроксила увеличивается.

Процесс вспучивания вулканического стекла во многом предопределяется формой связи его с водой и ее количеством. При попадании перлита в зону высоких температур образуется минеральный расплав, вязкость которого быстро снижается. Одновременно накапливается газовая фаза, давление которой интенсивно нарастает. Наступает момент, когда давление газовой фазы (паров воды) превосходит силы вязкого сопротивления и поверхностного натяжения, в результате чего происходит вспучивание расплава. Для успешного хода процесса необходимо совмещение по времени интенсивного выделения газовой фазы с переходом перлитовой породы в пиропластическое состояние.

Реологические характеристики (вязкость и поверхностное натяжение) расплава должны быть оптимальными для вспучивания. Чем выше вязкость, тем большее давление газовой фазы могут выдержать стенки пор. При малой вязкости пары воды будут прорываться наружу, не образуя пор. От поверхностного натяжения зависит требуемое значение давления газовой фазы. Поэтому оптимальными условиями вспучивания являются повышенная вязкость и пониженное поверхностное натяжение размягченного стекла, которые определяются его химическим составом и температурой. В интервале температур вспучивания вязкость всех изученных перлитов колеблется от 10^6 до 10^8 Па·с.

Достижение оптимальных условий вспучивания для перлитов различных месторождений обеспечивается в интервале температур 850...1250 °С. Лучшим сырьем для получения вспученного перлита являются породы, вспучивающиеся при температуре менее [illegible] °С. К трудновспучивающимся относят породы, температура вспучивания которых выше 1050 °С.

Вторым критерием качества перлитовой породы является коэффициент вспучивания $K_в$, характеризующийся приростом объема вспученного образца к его объему до вспучивания:

$$K_в = (V_{всп} - V_{пл})/V_{пл}, \qquad (9.1)$$

где $V_{пл}$ — объем образца в плотном состоянии.

Хорошо вспучивающиеся породы характеризуются высоким $K_в$ (13...16) и, наоборот, трудно вспучивающиеся разновидности природных стекол характеризуются более высокой насыпной плотностью и существенно меньшими значениями $K_в$ (6...8).

На температуру вспучивания и на вспучиваемость перлитовых пород большое влияние оказывает содержание в них Na_2O и K_2O, которые являются плавнями, понижающими температуру перехода перлита в пиропластическое состояние. Это создает предпосылки к совмещению активного выделения газовой фазы, которое наблюдается в интервале температур 900...950 °С, с переходом перлита в пиропластическое состояние. Поэтому пригодное для вспучивания перлитовое сырье должно содержать не менее 4% щелочей.

Существенное влияние на процесс вспучивания перлита оказывает количество содержащейся в породе воды и форма ее связи. Чрезмерно высокое содержание легко удаляемой молекулярной воды, привнесенной в породу за счет гидратации, как правило, нарушает процесс вспучивания. В этом случае интенсивное образование паров воды может иметь место до перехода перлита в пиропластическое состояние. Давление, создаваемое ими, столь велико, что приводит к «взрыву» обжигаемых частиц породы с образованием мелкой перлитовой пыли. Это явление чаще наблюдается при обжиге пород более раннего геологического возраста, в которых гидратационные процессы прошли более полно. К такому же явлению может приводить чрезмерно быстрый нагрев частиц породы, содержащей 3% воды и более.

С целью исключения растрескивания гранул производят двустадийный обжиг перлита: предварительный при температуре 250...450 °С, называемый термической подготовкой, при котором удаляется излишняя гидратная вода, и окончательный при оптимальной для данной породы температуре вспучивания.

Размеры частиц вспучиваемого перлита также оказывают влияние на коэффициент вспучивания. Как правило, чем мельче частицы породы, тем выше $K_в$. Это объясняется тем, что мелкие частицы быстрее и равномернее прогреваются по всему объему, чем крупные, и характеризуются практически одинаковой вязкостью при температуре вспучивания. Так, по данным ВНИИПИТеплопроекта, зависимость $K_в$ перлита Арагацкого месторождения от размера исходных зерен характеризуется следующими величинами:

Размер зерен, мм	0,22	0,25	0,74	0,76	0,82
$K_в$	15,8	16,8	11,2	10,4	10,1

Технология вспученного перлитового песка включает следующие основные операции: дробление породы и рассев по фракциям (часто эта операция осуществляется на дробильных заводах, находящихся непосредственно на перлитовых карьерах); термоподготовку (в случае необходимости); вспучивание, рассев по фракциям, складирование или переработку в изделия.

Термоподготовку осуществляют во вращающихся печах, печах кипящего слоя, в конвейерных сушилах и других тепловых агрегатах. Чаще всего для этой операции используют короткие вращающиеся печи барабанного типа, работающие по принципу противотока. Длина таких печей 3,8...6,5 м, внутренний диаметр 0,44...0,89 м, частота вращения — 2,6 мин$^{-1}$. В зависимости от количества воды, подлежащей удалению, определяются время и температура термоподготовки. Обычно температура не превышает 500 °C, а время термоподготовки перлита колеблется от 10 до 80 мин в зависимости от количества удаляемой воды и размера частиц перлита. Время нахождения перлита в печи обычно регулируют, изменяя угол наклона печи.

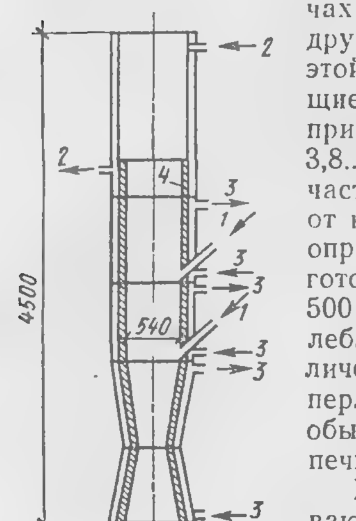


Рис. 9.1. Схема шахтной печи для производства вспученного перлита:

1 — загрузка молотого перлита; *2* — подача воздуха; *3* — подача воды; *4* — огнеупор

Печь термической подготовки устанавливают в одном потоке с печью вспучивания перлита выше ее загрузочного устройства. Это позволяет экономить технологическое топливо и повышать производительность всего комплекса, так как при такой компоновке тепловых аппаратов используется теплота перлита, приобретенная им в процессе термической подготовки.

Обжигают (вспучивают) перлит в шахтных, вращающихся, трубчатых станционарных печах, печах с кипящим слоем. В настоящее время в СССР перлитовый песок получают в основном в шахтных печах (рис. 9.1).

Шахтная печь вспучивания представляет собой круглую шахту с внутренним диаметром 0,6 м и высотой 7,7; 8,6 и 9,2 м, в которую снизу вверх подается поток раскаленных газов. Навстречу потоку в нижнюю часть печи загружается сырье. Технологические процессы, происходящие в печи при обжиге перлита, условно можно разделить на три стадии: частичное обезвоживание, размягчение и вспучивание, затвердевание и охлаждение.

Время пребывания материала в каждой зоне исчисляется в секундах, а общая продолжительность процесса, как правило, не должна превышать 1,5 мин. Самые мелкие частицы вспучиваются сразу и выносятся потоком газов из печи в циклоны, более крупные частицы падают вниз и, попадая в наиболее горячую зону, вспучиваются; при этом средняя плотность их уменьшается, они приобретают парусность и тоже выносятся из печи потоком газов. Вспученные частицы с дымовыми газами уносятся в системы осаждения — в циклоны грубой, а затем мелкой очистки.

Производительность шахтных печей конструкции НИИСМИ составляет 1,5...3,5 м^3/ч, а конструкции ВНИИПИТеплопроекта — 2...6 м^3/ч.

В шахтных печах перлит нагревается за счет передачи ему теплоты горячими газами, полученными от сжигания газообразного или жидкого топлива с малым избытком воздуха в специальных топках. Активный теплообмен в печах достигается интенсивным перемешиванием горячих газов с обжигаемым материалом во взвешенном состоянии.

Печь с кипящим слоем твердого теплоносителя разработана во ВНИИСтроме. В качестве твердого теплоносителя используется кварцевый песок с размером зерен 0,6...1,2 мм.

Замена газообразного теплоносителя твердым сокращает продолжительность обжига и расход топлива за счет повышения коэффициента теплопередачи от теплоносителя к обжигаемому материалу. Газ сгорает в слое песка и обеспечивает обжиг перлита с размером зерен 5...15 мм. Кипящий слой твердого теплоносителя служит также разделительной средой, в которой происходит сепарация продукта обжига по средней плотности. Вспученный перлит за счет снижения средней плотности всплывает в поверхностный слой и выгружается из печи через разгрузочный люк. Отходящие дымовые газы из зоны обжига очищаются в циклонах, а пылевидная фракция из них собирается в специальном бункере. Проектная мощность такой печи 20 тыс. м^3 вспученного перлита в год.

Изделия из вспученного перлита в зависимости от применяемого вида связующего подразделяют на два основных типа: безобжиговые — битумоперлит, пластоперлит, цементоперлит, силикатоперлит, стеклоперлит, гипсоперлит; обжиговые — керамоперлит, перлиталь, перлитофосфат, керамоперлитофосфат, термоперлит.

Изменяя гранулометрический состав перлита, можно направленно регулировать среднюю плотность и прочность изделий. Для изготовления более плотных и прочных изделий применяют перлитовый песок мелких фракций; увеличение крупности зерен перлита снижает среднюю плотность изделий за счет уменьшения содержания связующего. Однако при этом снижаются и прочностные показатели.

Применяют перлитовые изделия для хладоизоляции (до -200 °C), в этом случае используют битумное связующее; для тепловой изоляции при средних (до 600 °C) и высоких (до 1150 °C) температурах. Изделия выпускают в виде плит, скорлуп, сегментов, кирпича (табл. 9.1).

Таблица 9.1. Характеристика теплоизоляционных перлитовых изделий

Вид изделия	Средняя плотность, кг/м³	Теплопроводность, Вт/(м·°С), при 25°С	Прочность, МПа		Температура применения, °С
			при сжатии	при изгибе	
Битумоперлит	200 ... 300	0,07 ... 0,087	0,2 ... 0,3	0,15 ... 0,2	От —60 до +100
Пластоперлит	120 ... 300	0,052 ... 0,08	0,3 ... 1,3	0,15 ... 0,9	До 200
Перлитоцемент	225 ... 350	0,065 ... 0,081	—	0,22 ... 0,28	До 600
Стеклоперлит	180 ... 300	0,064 ... 0,093	0,3 ... 1,2	0,2 ... 0,7	600 ... 700
Силикатоперлит	350 ... 600	0,081 ... 0,105	0,9 ... 2,45	—	750 ... 800
Керамоперлит	250 ... 400	0,076 ... 0,105	0,3 ... 1	—	875
Керамоперлитофосфат	200 ... 500	0,07 ... 0,087	0,35 ... 1,55	—	1150

Вспученный перлит в изделиях выполняет роль высокопористого заполнителя, поэтому его средняя плотность и количественное содержание в формовочной смеси определяют пористость изделий, их среднюю плотность и теплопроводность. Вид связующего также оказывает влияние на основные свойства изделий, но главным образом определяет их температуру применения.

Производство всех видов перлитовых изделий включает следующие операции: подготовку и дозировку сырьевых материалов, смешивание компонентов, формование изделий и тепловую обработку. Исключение составляет битумоперлит, который не требует тепловой обработки.

Подготовка сырьевых компонентов заключается в измельчении и просеивании перлита, чтобы обеспечить нужную его гранулометрию.

При изготовлении формовочных масс основное внимание следует уделять сохранению гранул перлита, предохранению их от истирания. Этим основным требованием руководствуются при выборе типов смесительных аппаратов, определении порядка загрузки компонентов в смеситель и продолжительности перемешивания. Обычно вспученный перлит в смеситель загружают в последнюю очередь и перемешивание производят в течение 1 ... 2 мин. Для перемешивания применяют в основном лопастные смесители.

Формование перлитовых теплоизоляционных изделий осуществляют с помощью устройств, которые вызывают минимальное уплотнение смеси и не разрушают зерен перлита. Практика показывает, что применение прессования при давлении 0,05 МПа дает хорошие результаты.

Битумоперлит получают путем смешивания вспученного перлитового песка и расплавленного битума марок БН-IV и БН-V или их смеси. В этом случае к гранулометрии перлита предъявляют

следующие требования: содержание фракции размером менее 0,6 мм должно быть около 70%, а фракций более 2 мм — около 30%. При соотношении перлит:битум, равном 10:1 по объему, получают материал со средней плотностью от 300 до 450 кг/м

Битумоперлит в монолите и в виде изделий применяют для утепления и гидроизоляции совмещенных кровель, гидро- и теплоизоляции промышленных холодильников, теплотрасс и другого технологического оборудования, работающего при температуре от —50 до +60°С.

Следует указать, что битумное связующее практически исключает наиболее серьезный недостаток вспученного перлита — с увлажняемость. Средняя плотность битумоперлитовых изделий находится в определенной зависимости от насыпной плотност вспученного перлита ($\rho_н$, кг/м³): $\rho_{ср} = 1{,}65\rho_н + 160$.

Пластоперлит получают из вспученного перлитового песка и синтетических смол. Наиболее эффективными вяжущими являют ся композиции иденкумароновых, мочевиноформальдегидных, ал килфенольных и фенолформальдегидных смол.

После формования изделия проходят тепловую обработку сушильных камерах при температуре 140 ... 150°С. Расход смо на 1 м³ изделий составляет 40 ... 70 кг, а вспученного перлит 1,5 ... 1,6 м³.

Пластоперлитовые изделия применяют в качестве утеплител в трехслойных панелях, кровельных плитах, для устройства теплоизоляции кровель промышленных зданий по профилированному настилу, а также в холодильной технике.

Достоинствами этих изделий являются: низкая плотность, рошая теплоизолирующая способность, высокая прочность, срав нительно высокая водостойкость. К недостаткам следует отнест необходимость использования дорогих и дефицитных смол, нали чие вредных выделений, ограничение применения по температуре.

Перлитоцементные изделия (плиты, кирпич, скорлупы, сегмен ты) изготовляют из смесей, содержащих 1,0 м³ перлитового песк 120 ... 135 кг портландцемента марки 400, около 30 ... 35 кг расп шенного асбеста V сорта и 300 ... 350 л воды. Формовочную масс готовят в такой последовательности: сначала в растворосмесител наливают воду, затем загружают асбест, цемент и ведут перемешивание этих компонентов в течение 3,5 ... 4 мин. После получения однородной массы загружают перлитовый песок и окончательное перемешивание производят в течение 1,5 ... 2 мин. Формовочную смесь укладывают в пресс-формы, где смесь уплотняет под давлением 0,05 МПа, приобретает формовочную прочность и заданную геометрическую форму. Отформованное изделие выталкивается из пресс-формы на перфорированный поддон и направляется на тепловую обработку в специальную камеру, в котор совмещаются пропаривание и сушка. Сначала изделия выдерж вают в течение 4 ч при температуре 150°С, затем 6 ... 8 ч при те

пературе 80°C, обеспечивая ускоренное твердение цемента. После этого температуру резко поднимают до 150°C и высушивают изделия до влажности 15 ... 20%.

Изделия из стеклоперлита получают из смеси, содержащей, % по массе: вспученного перлитового песка — 60 ... 70; жидкого стекла плотностью 1,25 ... 1,35 г/см³ — 40 ... 30. Технология стеклоперлитовых изделий отличается от технологии перлитоцементных изделий лишь тепловой обработкой сырца, которую осуществляют в туннельных сушилках при температуре 300 ... 400°C. Изделия из стеклоперлита применяют для тепловой изоляции горячих поверхностей (до 600°C) технологическо оборудования и теплопроводов.

Силикатоперлитовые изделия изготовляют на известковом и известково-кремнеземистом вяжущем. Твердение происходит в автоклавах при давлении 0,8 ... 1,2 МПа по режиму: подъем давления 1 ч, выдержка при максимальном давлении 3 ч, сброс давления 1 ч. При этом имеет место взаимодействие перлита с гидроксидом кальция, в результате чего на границе зерен заполнителя и вяжущего образуются в основном высокоосновные гидросиликаты кальция.

На 1 м³ изделий со средней плотностью 250 ... 350 кг/м³ расходуется 15 кг молотой извести, 7 кг полуводного гипса, 105 ... ... 125 кг перлитового песка с насыпной плотностью 70 ... 90 кг/м³, 19 ... 20 кг асбеста V сорта и 450 ... 460 л воды. Подготовку материалов и приготовление формовочной смеси осуществляют следующим образом. Кормовую известь дробят и размалывают до удельной поверхности 3500 ... 4500 см²/г; асбест распушивают в голлендере, пропеллерной мешалке или на бегунах с последующей обработкой в быстроходном смесителе с 70% воды, необходимой для приготовления сырьевой смеси. Суспензию асбеста и извести перемешивают в вибросмесителе в течение 5 ... 8 мин. Туда же загружают гипс и перлитовый песок и продолжают перемешивание еще 1,5 ... 2 мин. Полученную гидромассу заливают в формы и загружают в автоклав.

Силикатоперлитовые изделия используют в виде термовкладышей в панелях наружных стен и покрытий, для устройства теплоизоляции горячих поверхностей (до 800°C).

Керамоперлитовые изделия формуют на гидравлических или фрикционных прессах из массы, содержащей, % по массе, 50 ... ... 60 вспученного перлитового песка и 40 ... 50 глины. Изделия более высокого качества получают при использовании огнеупорных или бентонитовых глин. Формовочную массу готовят путем смешивания перлитового песка с заранее приготовленным глиняным шликером. Отформованные изделия сушат и обжигают при температуре 750 ... 850°C.

Керамоперлитофосфатные изделия формуют из смеси, содержащей, % по массе; перлитового песка — 80, глины — 20 и сверх 100% — 25 ... 30 ортофосфорной кислоты. Предпочтительно применять огнеупорные тонкодисперсные пластичные глины. Тепловую обработку производят при температуре 900°C в течение 10 ч.

Изделия применяют главным образом для футеровки электронагревательных печей.

Перлитовый обжиговый легковес изготовляют из перлитового вспученного песка и легкоплавких связующих, характеризующихся высокой адгезионной способностью. Температура плавления связующего не должна превышать 800°C, что обусловлено температурой начала размягчения перлита. В качестве вяжущих используют жидкое стекло, буру, борную кислоту, хлористый литий и др.

Для получения 1 м³ изделий расходуется 120 ... 160 кг вспученного перлитового песка и 15 ... 20 кг легкоплавкого связующего. Технология легковеса аналогична технологии других видов обжиговых перлитных изделий. Отличие имеется в подготовке формовочной массы. Для получения однородной смеси массу после кратковременного перемешивания просеивают через сито с отверстиями 5 мм. Изделия обжигают при температуре до 800°C.

Наиболее рациональная область применения обжигового легковеса — тепловая изоляция горячих поверхностей электрического и промышленного оборудования.

Перлитовые изделия относят к эффективным теплоизоляционным материалам. Их высокие теплоизоляционные свойства при простоте технологии и огромных запасах сырья предопределяют необходимость дальнейшего развития этой группы материалов. Задача состоит в разработке новых видов изделий, с еще более высокими свойствами.

9.2. Вспученный вермикулит и изделия из него

Вермикулитами называют минералы из группы гидрослюд, способные вспучиваться при нагревании. Вермикулиты образуются в природных условиях в результате гидратации и других вторичных изменений различных слюд (магнезиальных и магнезиально-железистых, алюминиевых и литиевых). Практическое значение имеют вермикулиты, образовавшиеся из магниожелезистых слюд — биотита и флогопита.

Для слюд характерна слоистая структура: два элементарных слоя кремнекислородных тетраэдров и слой, состоящий из гидроксильных групп и ионов магния и железа (у биотита), образуют прочно связанный слюдяной пакет. В результате замещения иона Si^{4+} ионом Al^{3+} каждый пакет имеет избыточный отрицательный заряд, который уравновешивается двумя катионами K^{+}, расположенными между пакетами. Процесс гидратации первичных слюд при их переходе в вермикулит заключается в замене ионов калия молекулами воды, в слой которых втягиваются обменные ионы двухвалентных металлов (чаще всего Mg^{2+}). Между пакетами образуется гидратный слой, состоящий из гидратированных ионов

металлов и молекул воды в свободном состоянии. Структурная формула вермикулита может быть записана так:

$$4{,}5H_2O-Mg_{0{,}3-0{,}4}(Al_2O_6)(Mg, Fe, Al)_6O_{20}(OH)_4. \qquad (9.2)$$

В природных условиях вермикулитизация слюд флогопита и биотита происходит очень медленно, поэтому в них одновременно встречаются не только конечные продукты этого процесса, но и гидрослюды с различной степенью гидратации.

В СССР имеются крупнейшие месторождения вермикулита — это прежде всего Ковдорское в Мурманской области и Потанинское на Урале. Кроме них имеются месторождения на Дальнем Востоке, Урале, Украине, в Сибири, Казахстане. За рубежом наиболее крупные месторождения вермикулита находятся в США и ЮАР.

Причиной вспучивания вермикулита является выделение паров воды, давление которых направлено перпендикулярно плоскости спайности. В результате силового воздействия паров воды слюдяные пластинки раздвигаются, образуя сообщающиеся поры неправильной вытянутой формы, при этом объем зерна вермикулита увеличивается в 13 ... 15 раз.

Вода, содержащаяся в вермикулите, имеет различные формы связи с основным веществом минерала. В природном вермикулите различают следующие виды воды: конституционную (гидратную), входящую в состав молекулярной структуры материала; межпакетную, содержащуюся между пакетами слюды и прочно адсорбированную на плоскостях спайности; цеолитную, находящуюся в минерале в виде твердого раствора, и гигроскопическую, механически удерживаемую на поверхности зерен минерала.

Основным фактором, обеспечивающим вспучивание вермикулита при нагревании, считают выделение межпакетной воды. Она начинает удаляться при температуре 170 ... 200°С, наибольшая ее часть уходит при 270 ... 300°С, а окончательное удаление межпакетной воды происходит при 750 ... 800°С. При температуре 810 ... ... 880°С удаляются гидроксилы октаэдрического слоя, что сопровождается разрушением слюдяной структуры и образованием энстатитовой или оливиновой фаз.

Наряду с воздействием водяного пара в структурной решетке слюды при нагревании происходят внутренние изменения вследствие удаления цеолитной и гидратной воды, что приводит к короблению частиц и раскрытию листочков слюды.

На вспучивание зерен вермикулита оказывают влияние такие факторы, как структура, химический состав и влажность сырья, степень и характер гидратации слюды, т. е. порядок расположения гидратированных вермикулитовых и слюдяных слоев, размер зерен, режим обжига (максимальная температура, скорость и продолжительность нагрева).

Во всех случаях при использовании любого вермикулитового сырья стремятся удалить гигроскопическую влагу, после чего быстро прогреть зерна вермикулита до максимальной температуры вспучивания с целью наибольшего использования межпакетной воды.

Вспучивание вермикулита может быть оценено объемным коэффициентом вспучивания $K_в$, представляющим собой отношение объема вспученного материала ($V_в$) к объему исходного сырья (V):

$$K_в = V_в/V \approx 6.$$

Вермикулит характеризуется *низкой насыпной плотностью* (80 ... 200 кг/м³). В соответствии со стандартом он имеет марки 100, 150 и 200.

Теплопроводность вермикулита зависит как от насыпной плотности, так и от размера зерен. При температуре 25°С она находится в пределах 0,056 ... 0,07 Вт/(м·°С). При температуре до 100°С теплопроводность мелких фракций выше, чем крупных, имеющих более низкую насыпную плотность; при более высоких температурах, наоборот, более крупные фракции вследствие увеличения конвективного переноса теплоты в крупных порах характеризуются более высокой теплопроводностью, чем мелкие фракции.

Вспученный вермикулит обладает высоким звукопоглощением, невысокой гигроскопичностью, биостойкостью, огнестойкостью, его температура плавления 1210 ... 1250°С для Потанинского и 1320 ... ... 1350°С для Ковдорского месторождений. Водопоглощение вермикулита высокое вследствие развитой сообщающейся пористости; оно зависит от зернового состава и средней плотности зерен.

В соответствии со стандартом вспученный вермикулит делят на три фракции: крупную (5 ... 10 мм), среднюю (0,6 ... 5 мм) и мелкую ($<$0,6 мм). В отличие от вспученного перлита вспученный вермикулит обладает упругостью, которая выражается в его способности частично восстанавливать высоту предварительно сжатой пробы после снятия сжимающей нагрузки.

Строение зерен вспученного вермикулита анизотропное: в направлении, параллельном плоскостям спайности, прочность их больше. Упругие свойства, наоборот, проявляются в значительно большей степени при приложении нагрузки перпендикулярно плоскостям спайности.

Вспученный вермикулит обладает также хорошими адсорбционными свойствами. Различные полезные качества вспученного вермикулита позволяют широко его использовать не только в строительстве, но и в других областях народного хозяйства.

Технология вспученного вермикулита включает в себя добычу и обогащение сырья, его дробление, обжиг и рассев на фракции.

Вермикулитовые породы добывают открытым и шахтным способами. При малом содержании в породе вермикулита ее обогащают, доводя содержание вермикулита до 75 ... 90%. Обогащение

породы производят путем ступенчатого избирательного дробления с классификацией дробленой породы по крупности или совмещенным дроблением с мокрой отсадкой (грохочением). При пропускании породы через валковые дробилки зерна вермикулита разрушаются по плоскостям спайности на пластинки крупных и средних размеров, а пустая порода измельчается и легко удаляется при отсеве. При обогащении мелких фракций применяют отсадочные машины и концентрационные столы, где в потоке воды более легкие частицы вермикулита отделяются от тяжелых частиц пустой породы.

Дробление вермикулита производят в молотковых дробилках с ножеобразными билами. Вспучивание (обжиг) вермикулита осуществляют в шахтных печах конструкции ВНИИПИТеплопроекта и Киевского НИИСМИ, наклонных печах, прямоточных трубчатых печах (комбайнах) конструкции УралНИИстромпроекта.

В шахтных печах сырье подается через загрузочную воронку, расположенную в верхней части печи. Проходя через поток восходящих горячих газов, создаваемый форсункой низкого давления, вермикулит вспучивается и по наклонному поду печи поступает в бункер. При этом более мелкие частицы остаются в печи дольше крупных, что не соответствует условиям вспучивания. Опыт эксплуатации шахтных печей показал, что высококачественный продукт в них можно получать только при вспучивании узкофракционированного сырья, однородного по степени гидратации.

Более универсальной и эффективной является трубчатая печь конструкции УралНИИстромпроекта (рис. 9.2). Она состоит из футерованной горизонтальной трубы, в которой сжигается газ или жидкое топливо, и вращающегося барабана, расположенного над трубой, предназначенного для сушки сырья отходящими газами.

Подогретое сырье подается через барабанный питатель в горизонтальную трубу, в горящий факел, где оно быстро вспучивается и потоками газов и воздуха выносится в осадительную камеру. Вспученный вермикулит очищают от пустой породы в сепараторе, который установлен за осадительной камерой.

Печь работает по принципу прямотока, поэтому мелкие частицы, быстро нагреваясь, вспучиваются и выносятся из печи, а крупные и менее гидратированные задерживаются в ней дольше, до полного вспучивания, после чего они также выносятся потоком газов.

Изделия из вспученного вермикулита получают по технологии, аналогичной технологии изделий из вспученного перлита. В этом случае в качестве связующих применяют битум, жидкое стекло, портландцемент, глину, диатомит (трепел) и их комбинации. Свойства наиболее распространенных изделий приведены в табл. 9.2.

При изготовлении изделий используют полусухие формовочные смеси и в виде гидромасс. Формование изделий осуществляют соответственно прессованием при малом давлении и заливоч-

ным способом. Тепловую обработку производят в соответствии с примененным видом связующего.

Струнит — плотно упакованный в полиэтиленовую пленку вспученный вермикулит. Пленка заваривается по торцам изделия и, кроме того, с целью исключения воздушных подушек и уплотне-

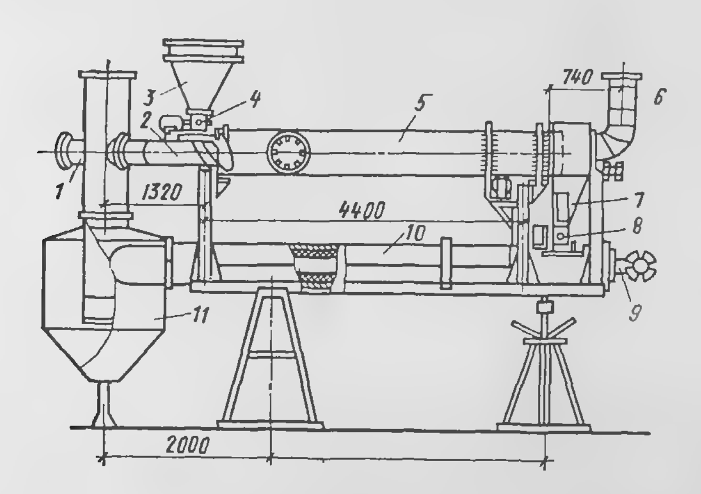


Рис. 9.2. Схема трубчатой печи (комбайна) для обжига вермикулита:

1 — всасывающий воздухопровод; *2* — подающий воздухопровод; *3* — загрузочный бункер; *4* — барабанный питатель; *5* — сушильный барабан; *6* — вытяжная труба; *7* — бункер для сухого сырца; *8* — барабанный питатель; *9* — форсунки; *10* — трубчатая печь; *11* — циклон

Таблица 9.2. **Основные свойства изделий из вспученного вермикулита**

Вид изделия	Средняя плотность, кг/м³	Теплопроводность, Вт/(м·°С)	Прочность, МПа		Температура применения, °С
			при сжатии	при изгибе	
Битумовермикулит:					
в изделиях	250 ... 310	0,08	—	0,2 ... 0,25	—50 до +60
в монолитной изоляции	500 ... 600	0,09 ... 0,11	0,4 ... 0,6	0,2 ... 0,25	—50 до +60
Керамовермикулитовые	300 ... 400	0,07 ... 0,09	0,5 ... 1,0	0,2 ... 0,5	До 1100
Вермикулитовые изделия на жидком стекле	250 ... 300	0,07 ... 0,09	0,4 ... 0,6	0,2	До 500
Асбестовермикулитовые	250 ... 350	0,07 ... 0,09	—	0,18 ... 0,26	—
Цементно-вермикулитовые	400 ... 500	0,08 ... 0,1	0,5 ... 1,0	—	1100*
Струнит	100 ... 150	0,05 ... 0,06	—	—	До 50

* По данным НИИЖБ Госстроя СССР вермикулитовые изделия на цементе можно применять при температуре до 1100°С, поскольку при нагревании цементного камня с тонкомолотой добавкой вспученного вермикулита полностью связывается выделяющийся свободный оксид кальция.

ния вермикулита проваривается в продольном направлении через 25...30 см. В результате образуется изделие в виде мата с плотно уложенным в нем вспученным вермикулитом.

Ценные свойства вермикулита пока используются недостаточно. Это объясняется главным образом несовершенством технологии обогащения породы, значительными транспортными расходами по ее доставке к местам переработки во вспученный вермикулит и изделия на его основе, недостаточностью проработок в области технологии изделий. Однако широкие возможности эффективного применения вермикулита и изделий из него требуют расширения объема производства этого материала.

Материалы на основе вспученного вермикулита применяют для изоляции горячих поверхностей в виде штучных изделий и торкрет-масс: на ТЭС, в промышленности строительных материалов (съемные своды кольцевых печей для обжига кирпича), в качестве термовкладышей в ограждающих конструкциях зданий, для устройства звукоизоляционных и декоративно-акустических конструкций, для получения конструкционно-теплоизоляционных бетонов и др.

ГЛАВА 10

ЯЧЕИСТЫЕ БЕТОНЫ

Ячеистыми бетонами называют большую группу искусственных пористых материалов на основе минеральных вяжущих и кремнеземистого компонента, содержащих равномерно распределенные поры трех видов: ячеистые, капиллярные и гелевые. Объем пор каждого вида и их характеристические значения приведены в табл. 10.1.

Таблица 10.1. **Характеристика пористости теплоизоляционного ячеистого бетона**

Средняя плотность бетона, кг/м³	Общий объем пористости, %	Объем твердой фазы, %	Ячеистые поры, размер, см	Ячеистые поры, объем, %	Капиллярные поры, размер, см	Капиллярные поры, объем, %	Гелевые поры, размер, см	Гелевые поры, объем, %
200	92	8	10^{-4} ... 0,25	83	10^{-5} ... 10^{-4}	7,5	10^{-6}	1,5
300	88	12	10^{-4} ... 0,2	76	10^{-5} ... 10^{-4}	9	10^{-6}	3
400	84	16	10^{-4} ... 0,15	70	10^{-5} ... 10^{-4}	10,5	10^{-6}	3,5

Анализируя табл. 10.1, можно отметить, что для теплоизоляционного ячеистого бетона характерна прежде всего ячеистая пористость; с увеличением средней плотности (с ростом содержания твердой фазы) повышается объем капиллярных и гелевых пор и возрастает их доля в общем объеме пор.

10.1. Виды и свойства ячеистых бетонов

Существует множество разновидностей ячеистого бетона, которые классифицируют по следующим признакам.

1. П о ф у н к ц и о н а л ь н о м у н а з н а ч е н и ю. Выделяют четыре вида ячеистого бетона: теплоизоляционный — средняя плотность до 500 кг/м³ ($П_{общ}$=82...92%); теплоизоляционно-конструкционный — средняя плотность 500...900 кг/м³ ($П_{общ}$=82... ...66%); конструкционный бетон для конструкционных элементов жилых и сельскохозяйственных зданий — средняя плотность 1000... ...1400 кг/м³ ($П_{общ}$=62...47%); жаростойкий (бетон для теплоизоляции и ограждающих конструкций промышленных печей) — средняя плотность от 800 до 1200 кг/м³ и температура применения до 800°С.

В учебнике в соответствии с программой курса рассматривается только теплоизоляционный ячеистый бетон.

2. П о с п о с о б у п о р о о б р а з о в а н и я. Принципиально различают три способа создания пористой структуры ячеистых бетонов: газообразование (газобетоны, газосиликаты и т. д.); пенообразование (пенобетоны, пеносиликаты и т. д.); аэрирование (аэрированный ячеистый бетон, аэрированный ячеистый силикат и т. д.).

Кроме того, известны и применяют разновидности этих способов и их совокупные комбинации. К таким способам относят вспучивание газообразованием в вакууме (небольшое разрежение), аэрирование массы под давлением (барботирование ее сжатым воздухом) с последующим снижением давления до атмосферного (баротермальный способ) и др.

3. П о в и д у в я ж у щ е г о в е щ е с т в а. В технологии ячеистых бетонов в качестве вяжущего используют в основном цементы (газобетон, пенобетон) и известь (газосиликат, пеносиликат) и реже — гипс. Применение автоклавной обработки открыло широкие возможности для применения в качестве компонентов вяжущего материалов, проявляющих в условиях гидротермальной обработки (давление 0,8...1,2 МПа) эффект гидратационного твердения. К этим материалам относят отходы промышленности и некоторые горные породы (в основном природные и искусственные стекла), содержащие оксиды кальция, магния, алюминия, железа и кремния. Наиболее широко из этой группы материалов применяют металлургические шлаки, отходы глиноземного производства, стеклобой, перлиты.

П о в и д у к р е м н е з е м и с т о г о к о м п о н е н т а. Наиболее широко при производстве ячеистых бетонов применяют кварцевый песок, при этом предпочтение отдается пескам, содержащим не менее 90% кремнезема. Применяют также в качестве кремнеземистого компонента золу-унос от сжигания бурых и каменных углей, кислые металлургические шлаки, отходы глиноземного производства и др. Вид кремнеземистого компонента входит состав-

ной частью в название ячеистого бетона, например, газозолобетон, газозолосиликат и т. п.

5. По способу твердения. Ячеистые бетоны делят на два класса: неавтоклавные (безавтоклавные), тепловлажностную обработку которых производят пропариванием, электропрогревом или другими методами нагрева при нормальном давлении, и автоклавные, которые твердеют при повышенных давлениях и температуре. Способ твердения отражается в названии ячеистого бетона, например пропаренный газобетон, автоклавный газосиликат и т. п.

Теплоизоляционные ячеистые бетоны предназначены главным образом для строительной теплоизоляции: утепление железобетонных плит покрытий и чердачных перекрытий, создание теплоизоляционного слоя в многослойных стеновых конструкциях зданий различного назначения. Кроме того, их применяют для тепловой изоляции трубопроводов и поверхностей технологического оборудования при температуре до 400°С. Жаростойкие теплоизоляционные бетоны используют в промышленной тепловой изоляции при рабочей температуре до 700°С.

По данным института «ВНИИТеплоизоляция», в 1985 г. в СССР было выпущено 1,5 млн. м^3 теплоизоляционных ячеистых бетонов, из них 60% приходится на газосиликат, 37% — на газобетон и лишь 3% — на пенобетон.

Среднее значение средней плотности теплоизоляционного ячеистого бетона, выпускаемого промышленностью, 400 кг/м^3 (на передовых предприятиях — 330); прочность при сжатии 0,8... ...1,2 МПа; теплопроводность 0,11 Вт/(м·°С).

Физико-механические свойства ячеистого бетона определяются главным образом объемом ячеистой пористости и характеристиками пористой структуры.

Средняя плотность ячеистого бетона определяется средней плотностью твердой фазы (межпоровых перегородок) и общим объемом ячеистых пор, образовавшихся в результате воздухововлечения и искусственной поризации массы. В свою очередь, средняя плотность материала межпоровых перегородок (силикатного камня) меняется в зависимости от применяемых сырьевых материалов (от вида кремнеземистого компонента и вяжущего), количества воды затворения, способа поризации ячеистобетонной массы, гранулометрии кремнеземистого компонента, определяющей плотность его укладки. Например, для ячеистых бетонов на золе средняя плотность силикатного камня составляет 2000 ... 2100 кг/м^3, а на кварцевом песке — 2600 ... 2650 кг/м^3.

Увеличение воды затворения приводит к возрастанию капиллярных пор, некоторому снижению средней плотности силикатного камня, но к ухудшению эксплуатационных свойств

Строительно-эксплуатационные свойства ячеистых бетонов в значительной мере зависят от общей пористости и характеристики пор. Наиболее благоприятные показатели пористости теплоизоляционного ячеистого бетона в зависимости от его средней плотности приведены в табл. 10.1.

Специфика пористой структуры предопределяет анизотропию основных свойств ячеистого бетона. Его прочность при приложении сжимающей нагрузки перпендикулярно направлению вспучивания, как правило, на 15 ... 20% выше, чем при приложении нагрузки параллельно направлению вспучивания. Это объясняется деформацией пор, происходящей вследствие осадки свежевспученной ячеистой массы и также давления верхних слоев массы на нижние. В результате поры деформируются, приобретая овальную форму с максимальным размером по горизонтали. Поэтому испытания образцов ячеистого бетона производят в положении, соответствующем работе изделия в конструкции.

Автоклавные ячеистые бетоны характеризуются большей (в 1,5 ... 1,8 раза) прочностью, чем неавтоклавные.

Прочность ячеистых бетонов в значительной степени зависит от их влажности. Прочность при сжатии в сухом состоянии на 20 ... 40% выше водонасыщенного материала. При этом наибольшее снижение прочности наблюдается при увлажнении ячеистого бетона до 7 ... 12%, что соответствует величине сорбционного увлажнения соответственно ячеистых бетонов на кварцевом песке и золе-уносе.

В зависимости от применяемой технологии (литьевой или комплексной вибрационной)влажность ячеистого бетона после тепловлажностной обработки колеблется в пределах от 15 до 35% по массе. Через 1,5 ... 2 года эксплуатации в нормальных условиях в ячеистых бетонах устанавливается равновесная влажность, равная 6 ... 9% для бетонов на кварцевом песке и 10 ... 15% — на золе-уносе.

Влажность ячеистых бетонов существенно влияет на их теплопроводность. На каждый процент влажности прирост теплопроводности составляет от 7 до 8,5%. Решающим фактором снижения теплопроводности является повышение общей пористости. Так, при снижении средней плотности ячеистого бетона на 100 кг/м^3 теплопроводность уменьшается на 20%.

Морозостойкость ячеистых бетонов, как правило, превышает 25 циклов попеременного замораживания и оттаивания. Весьма существенное влияние на морозостойкость ячеистых бетонов оказывают структура цементного камня и вид применяемого вяжущего. Так, в частности, ячеистые бетоны на цементе и кварцевом песке характеризуются более высокой морозостойкостью, чем газосиликаты и газозолобетон. Применение оптимальных составов сырьевой шихты на грубомолотых песках и комплексной вибрационной технологии позволяет получать ячеистые бетоны, выдерживающие до 100 циклов попеременного замораживания и оттаивания.

В эксплуатационных условиях при снижении влажности окружающей среды наблюдается изменение линейных размеров ячеис-

тобетонных изделий, т. е. имеет место влажностная усадка. Влажностная усадка ячеистого бетона происходит главным образом под воздействием капиллярных сил и за счет испарения межкристаллизационной воды силикатного камня. Снижения влажностной усадки и повышение трещиностойкости ячеистого бетона достигают применением композиционного состава песка, состоящего из грубомолотой и тонкомолотой фракций, назначением оптимального соотношения компонентов сырьевой шихты и параметров тепловлажностной обработки.

Ячеистые бетоны обладают высокой огнестойкостью, они выдерживают без видимых разрушений воздействие огня в течение 4 ч. Нагретая поверхность изделия под действием струи воды разрушается незначительно. Огнестойкость ячеистых бетонов превышает этот показатель плотных цементных бетонов.

Ячеистые бетоны обладают высокими акустическими свойствами: звукопоглощающей и звукоизолирующей способностью. Этот вопрос подробно рассматривается в VI части учебника.

10.2. Технология ячеистых бетонов

Производство изделий из теплоизоляционного ячеистого бетона включает следующие основные технологические операции: подготовку сырьевых материалов, приготовление ячеистобетонной смеси, формование изделий и их тепловлажностную обработку.

Подготовка сырьевых компонентов. Для того чтобы обеспечить повышенную устойчивость поризованной массы на стадиях формования изделий и набора структурной прочности, а также для создания большего объема цементирующих новообразований при твердении, в технологии теплоизоляционных ячеистых бетонов используют тонкодисперсные композиции. Тонкому измельчению подвергаются кремнеземистый компонент и известь. Цемент и алюминиевая пудра, как правило, помолу не подвергаются, так как они уже имеют достаточно высокую удельную поверхность. Однако дополнительное измельчение этих компонентов в составе смеси обеспечивает активизацию вяжущего и газообразователя, а также существенно повышает однородность смеси, что положительно отражается на всех свойствах ячеистого бетона и позволяет получать материалы с низкой средней плотностью (подробнее см. гл. 5).

На практике применяют два способа подготовки сырьевых материалов:

мокрый помол основной массы кремнеземистого компонента (песка) и сухой помол известково-песчаного вяжущего (при соотношении известь:песок, равном 1:2). Содержание воды в песчаном шламе поддерживают на уровне, обеспечивающем хорошую его текучесть (плотность шлама около 1,6 г/см^3);

совместный сухой помол компонентов сырьевой шихты — извести, цемента и песка при влажности последнего не выше 2% по массе.

После помола основные компоненты сырьевой смеси должны характеризоваться следующей дисперсностью $S_{уд}$, см^2/г: кремнеземистый компонент (песок) — не менее 1500 ... 2000; известь — 4500 ... 5000; цемент — 3000 ... 4000.

Как мокрый, так и сухой помол должен проводиться в присутствии ПАВ, что интенсифицирует измельчение, частично предотвращает агрегирование (слипание) частиц, уменьшает намол металла. Дозировка ПАВ — 0,1 ... 0,25% от массы сухих компонентов.

Приготовление ячеистобетонной смеси. Способы приготовления формовочных масс зависят от принятой на данном производстве технологии (литьевой или вибрационной) и вида применяемого порообразователя. Эта технологическая операция при газо- и пенобетонном производствах имеет различные конечные задачи. При газобетонной технологии приготовление формовочной смеси включает дозирование и смешивание всех компонентов до получения однородного раствора с заданными технологическими свойствами. Поризация раствора в этом случае происходит на стадии формования изделий. Наиболе важным фактором, влияющим на ячеистую структуру ячеистобетонной смеси и готового ячеистого бетона, является равномерность распределения небольшого количества (0,6 ... 0,7 кг/м^3) газообразователя (алюминиевой пудры) во всем объеме смеси.

При пенобетонной технологии конечной целью данной технологической операции является получение готовой поризованной массы с заданными характеристиками.

Газобетонную смесь приготовляют следующим образом. Отдозированные компоненты смеси загружают в вертикальный самоходный газобетоносмеситель емкостью 5 м^3 при включенном перемешивающем механизме. Загрузку производят в такой последовательности: песчаный или зольный шлам, недостающее количество воды, вяжущее, газообразователь. Добавки — гипс, жидкое стекло, ПАВ и др. — вводят в смеситель совместно с вяжущим. Алюминиевую пудру обезжиривают путем активного перемешивания в растворе ПАВ и вводят в приготовляемую газобетонную смесь в виде суспензии.

Перемешивание составляющих до загрузки газообразователя производят 3 ... 5 мин, после загрузки газообразователя — 1 ... ... 3 мин во время перемещения газобетоносмесителя к формовочному посту.

При вибрационной технологии перемешивание осуществляется при вибрации корпуса смесителя.

При приготовлении смеси для пенобетона в смеситель с готовым раствором, содержащим кремнеземистый компонент, вяжущее и добавки, вводят техническую пену, которую получают в

специальном пеновзбивателе. Газобетонную смесь приготовляют в одном смесительном аппарате, а пенобетонную ячеистую массу — в трехбарабанном, реже в двухбарабанном смесителе (пенобетоносмесителе).

Приготовление формовочных масс для газобетона предусматривает подогрев шлама и воды до 40...50°С для достижения температуры смеси не ниже 35°С. Это обеспечивает интенсификацию взаимодействия алюминиевой пудры с $Ca(OH)_2$ раствора.

Проектирование составов ячеистобетонных смесей осуществляют, исходя из заданной средней плотности ячеистого бетона, применяемых видов вяжущего и кремнеземистого компонента, вида тепловлажностной обработки. При этом стремятся получить максимальную прочность при минимально возможном расходе вяжущего и порообразователя.

Подробно проектирование составов теплоизоляционных ячеистых бетонов изложено в лабораторном практикуме по технологии теплоизоляционных материалов.

Формование изделий из газо- и пенобетонной смеси. Газобетонная технология предусматривает вспучивание (поризацию) ячеистобетонной смеси до заданных значений средней плотности непосредственно в форме. При пенобетонной технологии пенобетонная масса с заданными значениями пористости или средней плотности, достигнутыми в пенобетоносмесителе, заливается в формы на полный объем, причем в дальнейшем значительного изменения пористости не происходит.

В технологии газобетонных изделий стадия формования — одна из важнейших технологических операций, так как именно на этой стадии происходит формирование пористой структуры материала. Основное условие в этом процессе, которое должно неукоснительно соблюдаться, — соответствие кинетики газовыделения изменению реологических свойств массы.

Регулирование интенсивности этих двух процессов осуществляют путем изменения температуры поризуемой массы, а также изменением ее водосодержания в совокупности с введением ПАВ или путем приложения к ней внешних динамических воздействий — вибрации. В соответствии с этим на практике применяют литьевую или вибрационную технологию формования газобетонных изделий.

При литьевой технологии вспучивание ячеистобетонной массы происходит в неподвижных формах в течение 25...50 мин, при вибровспучивании форму со смесью, установленную на виброплощадке, вибрируют в течение всего процесса газовыделения (3...6 мин) с частотой 15...150 ГЦ и амплитудой 0,6...0,2 мм.

Средняя плотность газобетона при постоянной дозировке газообразователя зависит от газоудерживающей способности смеси, которая, в свою очередь, определяется изменением во времени ее структурно-механических характеристик. Если смесь после газовыделения не будет обладать определенной устойчивостью (структурной прочностью), произойдет ее осадка, сопровождающаяся «ложным кипением» — прорывом газа из массы. В этом случае структура ячеистого бетона будет характеризоваться наличием большого количества сообщающихся пор, неоднородностью распределения пористости, неправильной формой пор. Если же схватывание будет опережать газовыделение, то смесь затвердеет до того, как завершится газовыделение и заданная средняя плотность ячеистого бетона не будет достигнута. В этом случае межпоровые перегородки будут пронизаны трещинами, не исключено наличие крупных трещин в массиве изделия. В результате эксплуатационные показатели материала будут существенно снижены.

Для исключения этих негативных явлений в процессе вспучивания и структурообразования газобетонных смесей необходимы условия, при которых скорости обоих процессов (газовыделения и изменения реологических свойств смеси) окажутся строго сбалансированными. Причем наилучшие условия для формирования структуры газобетона создаются тогда, когда показатели реологических свойств смеси возрастают медленно в начале процесса газообразования, а в конце его — быстро.

При литьевой технологии достижение необходимых условий для поризации газобетонной смеси осуществляют, изменяя ее температуру и водосодержание, вводя пластифицирующие добавки.

Наиболее эффективным приемом является вибровспучивание. Вибрационная технология, разработанная в СССР, базируется на использовании высоковязких газобетонных смесей с низким водотвердым отношением — около 0,35...0,4 против 0,55...0,65, оптимального для литьевой технологии. Под воздействием вибрации происходит тиксотропное разжижение газобетонной массы за счет высвобождения иммобилизованной воды. Кроме того, частицы массы при вибрации находятся в движении, т. е. система течет. В этих условиях предельное напряжение сдвига системы, оказывающее сопротивление образованию газовых пузырьков, снижается до минимума, что существенно облегчает начало порообразования в массе. Вязкость же массы может легко регулироваться изменением исходного водосодержания и интенсивности вибрации, которая предопределяет степень разрушения структуры пластично-вязкой системы (смеси) и, следовательно, изменение ее вязкости.

При вибровспучивании весьма полезно введение в смесь пластифицирующих добавок, что позволяет дополнительно снизить водосодержание смеси. При изготовлении теплоизоляционных газобетонных изделий, как показывает практика, наилучшие технико-экономические показатели достигаются при формовании крупных массивов с последующей их резкой на плиты заданных размеров. При формовании таких массивов по вибрационной технологии решающее влияние на условия поризации оказывают параметры вибрационной обработки, которые должны изменяться в процессе вибровспучивания: в начале процесса (до начала актив-

ного газовыделения) должна применяться низкочастотная вибрация с большой амплитудой ($n=10...25$ Гц, $A=1...1,25$ мм), а при активном газовыделении — высокочастотная вибрация ($n=100...150$ Гц, $A=0,15...0,2$ мм). Она может передаваться на массу с помощью плавающего виброщита. Предпочтительнее применять горизонтально направленную вибрацию, воздействие которой уменьшает вероятность вскипания массы при вспучивании, т. е. прорыва массы выделяющимися газами.

После прекращения вибрационных воздействий быстро восстанавливаются разрушенные вибрацией структурные связи, в результате резко возрастают пластическая прочность и несущая способность поризованной массы, исключается ее осадка.

Таким образом, применение комплексной вибрационной технологии позволяет значительно снизить водотвердое отношение, интенсифицировать технологический процесс изготовления ячеистого бетона, повысить качество изделий.

Снижение водотвердого отношения (водосодержания) обеспечивает повышение плотности и прочности цементного камня, интенсификацию твердения вяжущего, уменьшение затрат теплоты на прогрев изделий в процессе их тепловлажностной обработки, уменьшение послеавтоклавной влажности, улучшение микропористой структуры межпоровых перегородок (уменьшение доли капиллярных пор) и повышение физико-технических свойств материала (снижение влажностной усадки, уменьшение водопоглощения, повышение морозостойкости).

Интенсификация технологического процесса при применении вибрации выражается в ускорении процессов: гомогенизации на стадии приготовления ячеистобетонных масс за счет оптимизации реологических свойств и вибрационного перемещения частиц; газовыделения вследствие увеличения pH смеси, обнажения новых реакционных поверхностей на частицах алюминиевой пудры за счет «сдирания» продуктов реакции между Al и $Ca(OH)_2$; схватывания массы и приобретения массивами прочности, достаточной для их разрезки; тепловлажностного твердения массы из-за повышенной температуры массивов в момент начала тепловлажностной обработки.

Для получения теплоизоляционного бетона низкой средней плотности эффективно применять предварительную поризацию смеси, так называемую газопенную технологию. Этот технологический прием осуществляют, аэрируя песчаный шлам на стадии мокрого помола песка в присутствии ПАВ или формовочную смесь на стадии приготовления ячеистобетонной массы в смесительном аппарате.

Формование газобетонных массивов осуществляют в металлических формах высотой до 600 мм. Перед заливкой массы формы должны быть тщательно очищены, смазаны, стыки уплотнены. Формы заполняют формовочной массой за один прием на высоту, обеспечивающую полное заполнение формы после вспучивания

(высота заполнения составляет примерно 1/3). Высоту заполнения форм в зависимости от заданной средней плотности изделий определяют по формуле

$$h = 1,2h_0 \frac{\rho_м}{\rho_р}, \qquad (10.1)$$

где h_0 — высота формы; $\rho_м$ — заданная (расчетная) средняя плотность вспученной массы; $\rho_р$ — средняя плотность раствора.

Для обеспечения нормального вспучивания формовочной массы температура окружающей среды должна быть не ниже 18°С.

При литьевой технологии применяют стендовый метод. В этом случае формы устанавливают вдоль пути передвижения газобетоносмесителя, формы после их заполнения смесью не должны перемещаться или подвергаться сотрясениям вплоть до окончания процесса вспучивания и схватывания массы.

Формование изделий при вибрационной технологии осуществляется по агрегатно-поточной или конвейерной схеме. Подготовленные формы подаются на виброплощадку, жестко крепятся на ней, заполняются смесью и подвергаются вибрационной обработке, которая начинается одновременно с началом заливки массы. После окончания вибровспучивания форма передается на пост вызревания для набора прочности, обеспечивающей снятие горбушки и разрезку массива (его примерные размеры 6×1,5×0,6 м) на изделия. Горбушка образуется только при газообразовании, в пенобетоне она отсутствует. Операции по удалению горбушки и разрезке массивов производят на специальной машине с помощью металлических струн, совершающих возвратно-поступательное и вращательное движения.

Тепловлажностная обработка. Этот технологический процесс при получении эффективных теплоизоляционных ячеистых бетонов осуществляется автоклавированием при давлении 0,8... ...1,3 МПа и температуре водяного пара 175...191°С (в автоклавах диаметром 2; 2,6 или 3,6 м). Автоклавную обработку применяют для увеличения прочности изделий за счет связывания извести, которая вводится в сырьевую смесь для активизации газообразования или в качестве основного компонента вяжущего, с кремнеземистым компонентом.

По А. В. Волженскому, автоклавная обработка проходит в три стадии. Первая стадия начинается с момента пуска пара в автоклав и заканчивается при достижении равенства температур теплоносителя и изделий по всей их толщине. Изделие нагревается двумя путями: за счет теплопроводности и теплотой, выделяющейся при конденсации пара, который проникает в материал через его поры. При этом влажность изделий увеличивается. Начало второй стадии соответствует моменту выравнивания температуры изделия по его сочетанию. Решающие факторы, определяющие скорость прогрева изделий, — интенсивность подъема давления пара на первой стадии, значения исходной температуры и

влажности ячеистобетонной массы. Быстрый подъем давления в автоклаве, повышение температуры массива во время поризации массы и снижение его влажности позволяют существенно сократить продолжительность первой стадии и всего цикла автоклавной обработки (табл. 10.2).

Таблица 10.2. **Продолжительность прогрева газобетонных изделий со средней плотностью 350 кг/м³ при автоклавной обработке**

Длительность подъема температуры в автоклаве до 175°С, ч	Исходная температура массива, °С	Длительность прогрева, ч, середины изделия до максимальной температуры при толщине изделия, мм		
		200	300	600
1	30	4,5	7	11,5
	75	2,0	3,5	6,5
2	30	5,5	8	12,5
	75	2,5	4	7,5
4	30	6,5	9,5	14
	75	3	4,5	8

Начало второй стадии автоклавной обработки совпадает с максимальным развитием химических и физико-химических процессов, обусловливающих формирование структуры цементирующего вещества и интенсивный набор прочности материалом. Основным процессом в автоклаве является взаимодействие $Ca(OH)_2$ и SiO_2, в результате которого образуются гидросиликаты кальция. Первоначально в результате избытка насыщенного раствора $Ca(OH)_2$ и недостатка в растворе силикат-ионов (вследствие медленного растворения кремнезема) образуются богатые известью двухосновные гидросиликаты кальция $C_2S(HA)$. В дальнейшем при полном связывании свободной $Ca(OH)_2$ в высокоосновные гидросиликаты кальция продолжающийся процесс растворения кремнезема приводит к образованию низкоосновных гидросиликатов кальция CSH(B) и тобермарита.

Формирование этих новообразований сопровождается интенсивным набором прочности. В случае применения смешанного вяжущего (цемент:известь=1:1) или цемента с 10%-ной добавкой извести помимо указанных процессов происходит ускоренное гидратационное твердение клинкерных минералов по обычной схеме.

Продолжительность второй стадии — изобаротермической выдержки — определяется дисперсностью, активностью и соотношением компонентов вяжущего, а также водотвердым отношением и температурой обработки. На конечную микроструктуру межпоровых перегородок существенное влияние оказывают такие факторы, как тонкость помола кремнеземистого компонента, количественное соотношение между известью и кремнеземистым компонентом с учетом активности извести. С повышением тонкости помола кремнеземистого компонента быстрее и полнее протекают процессы образования CSH(B). Для получения низкоосновных силика-

тов кальция соотношение между известью и кремнеземистым компонентом должно находиться в определенных пределах и уточняться с учетом активности извести и вида применяемого кремнеземистого компонента. Например, за исходное соотношение между вяжущим и кремнеземистым компонентом (при активности извести 70%) рекомендуется принимать (в весовых частях В:К): при применении портландцемента с 10%-ной добавкой извести ~1:1; при смешанном вяжущем (Ц:И=1) ~1:1,5; при использовании только извести ~1:3.

Третья, конечная стадия автоклавной обработки — снижение температуры и давления пара. При этом из изделий интенсивно испаряется вода, что вызывает значительные напряжения, иногда превышающие прочность ячеистого бетона и приводящие к образованию трещин в изделиях. Для предотвращения трещинообразования при коротких режимах охлаждения применяют ступенчатый режим снижения давления пара.

Для испарения как можно большего количества воды из изделий в конце охлаждения в автоклаве создают некоторое разрежение, т. е. производят вакуумирование. Рациональные режимы автоклавной обработки теплоизоляционного ячеистого бетона приведены в табл. 10.3.

Таблица 10.3. **Режимы автоклавной обработки теплоизоляционного ячеистого бетона со средней плотностью 200 ... 300 кг/м³**

Толщина изделий, мм	Продолжительность, ч				Общая продолжительность
	подъема давления до 1 МПа ($T=183°C$)	изотермической выдержки	снижения давления по ступенчатому режиму	вакуумирования автоклава	
200	1	5	1,5	1	8,5
300	1	5	1,5	1	8,5
600	1,5	8	2,5	1	13

Примечание. При избыточном давлении в автоклаве 0,8 МПа продолжительность изобаротермической выдержки увеличивается на 1 ч, а при давлении 1,2 МПа — уменьшается на 1 ч.

При выпуске калиброванных теплоизоляционных изделий заготовки, на которые ячеистобетонные массивы разрезаются до или после автоклавной обработки, фрезеруют. Калиброванные изделия могут подвергаться поверхностной гидрофобизации на конвейерной линии для уменьшения увлажнения при транспортировании и монтаже. Готовые изделия из теплоизоляционного ячеистого бетона должны быть упакованы в пакеты и храниться в помещениях с хорошей вентиляцией. Транспортировать изделия следует в контейнерах, предохраняющих бетон от воздействия атмосферной влаги.

10.3. Перспективные направления совершенствования технологии и повышения качества теплоизоляционного ячеистого бетона

Продолжающиеся теоретические проработки и экспериментальные исследования, выполняемые советскими и зарубежными учеными, показывают возможность дальнейшего существенного повышения качества теплоизоляционных ячеистых бетонов: снижения средней плотности, повышения прочности и морозостойкости, уменьшения гигроскопичности. Поэтому совершенствование технологии теплоизоляционных ячеистых бетонов должно вестись в сторону стабильного получения в заводских условиях изделий со средней плотностью 180 ... 200 кг/м^3, прочностью при сжатии не менее 0,4 МПа и теплопроводностью 0,06 ... 0,07 Вт/(м·°С).

Исследования, выполненные в МИСИ им. В. В. Куйбышева, НИИЖБе Госстроя СССР, ВНИИТеплоизоляции, других научно-исследовательских институтах и вузах, позволяют наметить технологические приемы, обеспечивающие достижение таких показателей свойств теплоизоляционных ячеистых бетонов.

Достигнуто это может быть путем формирования силикатного камня повышенной прочности, создания в материале поровой структуры, характеризующейся равномерным распределением пор в объеме изделия, и рациональным соотношением ячеистой и капиллярной пористости.

Повышение прочностных показателей силикатного камня, образующего несущий скелет ячеистого бетона, достигается следующими технологическими средствами:

применением кремнеземистого компонента полифракционного состава с целью снижения его межзерновой пустотности и соответственно расхода вяжущего при одновременном повышении плотности межпоровых перегородок;

повышением однородности ячеистобетонной смеси;

введением в состав ячеистобетонной смеси тонкодиспергированных природных или искусственных стекол, приобретающих при автоклавной обработке в присутствии добавок-активизаторов твердения или без них высокие прочностные показатели;

дисперсным армированием тонковолокнистой добавкой;

повышением однородности ячеистобетонной смеси за счет применения совместного помола компонентов и интенсивного перемешивания в скоростных вибро- и гидродинамических смесителях;

осуществлением предавтоклавного «вызревания» ячеистобетонных массивов в специальной камере при температуре 80 ... 90°С и влажности воздуха не выше 75%, что обеспечивает равномерный прогрев массы и снижение ее влажности более чем в 2 раза.

Формирование высококачественной структуры ячеистой пористости с общим объемом более 90% может быть достигнуто в результате: повышения однородности распределения алюминиевой пудры в ячеистобетонной смеси; предварительной поризации

массы на стадиях мокрого помола кремнеземистого компонента или при приготовлении ячеистобетонной массы в смесителе путем применения воздухововлекающих добавок; применения специальных газообразователей — гидрофильных газопаст и газопенопаст, характеризующихся отсутствием эффекта «старения» и хорошим распределением в ячеистобетонной массе, способствующих дополнительному воздухововлечению при перемешивании ячеистобетонного раствора в смесителе; создания интенсивных внешних механических воздействий (вибрационных, колебательных, ударных, ультразвуковых и т. д.) на стадии вспучивания ячеистобетонной массы.

На стадии автоклавного твердения целесообразно запаривание при интенсивном подъеме температуры и давления предварительно разогретых и подсушенных ячеистобетонных массивов; изобаротермическая выдержка должна быть короткой для предотвращения деструктивных явлений, которые могут иметь место в результате рекристаллизации новообразований. Однако она должна быть достаточной для обеспечения полного прохождения реакций, в результате которых образуются низкоосновные силикаты кальция. При назначении продолжительности изобаротермальной выдержки необходимо также учитывать массивность запариваемых изделий.

Сброс давления следует осуществлять быстро, в течение 1,5 ... ... 2 ч, что позволяет существенно снизить влажность изделий после автоклавной обработки.

Для повышения долговечности теплоизоляционных изделий из ячеистого бетона их поверхность следует покрывать специальными эмульсиями латексов, жидким стеклом, затирочными растворами с битумом, отходами нефтехимического синтеза.

Следует также иметь в виду, что извлечение ячеистобетонных изделий из автоклава после гидротермальной обработки сопровождается возникновением (особенно в массивах) значительных термических и влажностных напряжений, которые могут приводить к образованию микротрещин в силикатном камне и, как следствие, к снижению долговечности изделий.

Термические напряжения в изделиях возникают в результате температурного перепада между окружающей средой и температурой изделий. Напряжения этого рода σ_T с достаточной степенью точности можно определить, пользуясь следующей зависимостью:

$$\sigma_T = KE\alpha\Delta t\,(1-\nu), \qquad (10.2)$$

где K — коэффициент релаксации напряжений, зависящий от структурных характеристик силикатного камня (он всегда больше 0 и меньше 1); E — модуль упругости силикатного камня; α — коэффициент линейного термического расширения силикатного камня; ν — коэффициент Пуассона; Δt — разность температуры поверхности изделия и окружающей среды.

Неравномерная деформация изделий, обусловленная влагоотдачей при их остывании, также является причиной возникновения напряжений (влажностных) σ_W, величина которых зависит от интенсивности влагоотдачи ячеистым бетоном im, т. е.

$$\sigma_W = f(im). \qquad (10.3)$$

Таким образом, суммарное внутреннее напряжение, возникающее в остывающем ячеистом бетоне, равно

$$\sigma = \sigma_T + \sigma_W. \qquad (10.4)$$

Если σ превышает прочность силикатного камня при растяжении, т. е. если $\sigma > \sigma_р$, то в нем возникают микротрещины, которые развиваются в процессе эксплуатации.

На напряженное состояние ячеистого бетона оказывают влияние следующие факторы: микроструктура силикатного камня; анизотропия свойств ячеистого бетона (чем она ниже, тем больше значения коэффициента Пуассона и тем меньше напряжения); объем капиллярной пористости (чем он меньше, тем ниже напряжения); температурный градиент, который существенно влияет на σ_T и снижение которого значительно уменьшает внутренние напряжения в ячеистом бетоне; градиент потенциала переноса влаги в материале, уменьшение которого благоприятно сказывается на напряженном состоянии изделий.

Из всех перечисленных факторов наиболее легко управляемыми являются два последних. Их можно регулировать, применяя достаточно простые технологические приемы. Например, вакуумирование автоклава позволяет существенно снизить влажность изделий; выдерживание изделий в специальных камерах при влажности воздуха 80...90% и температуре 60...80°С в течение 3...6 ч практически полностью предотвращает образование микротрещин и примерно на 20% позволяет увеличить прочность ячеистого бетона.

В последнее время разработаны высокопроизводительные установки — пеногенераторы, применение которых в сочетании с высокоэффективными пенообразователями делают способ пенообразования при производстве ячеистых бетонов весьма перспективным. Особенно хорошие результаты получены при способе сухой минерализации пены. В этом случае широкое использование может найти пеногипс.

10.4. Техника безопасности на предприятиях неорганических теплоизоляционных материалов

На производстве неорганических теплоизоляционных материалов используют различное оборудование. К числу агрегатов, требующих наиболее строгого соблюдения правил техники безопасности, относят печи (особенно плавильные) и автоклавы. При работе с плавильными печами должен осуществляться постоянный

контроль за состоянием футеровки и кладки, так как недопустимый износ футеровки может привести к вытеканию расплава через места повреждения наружу. Водоохлаждаемые части печей (например, вагранок) следует питать водой, очищенной от накипеобразователей или применять охлаждение паром. Образование накипи на стенках может вызывать пережог металла со стороны огня, закупорку или существенное уменьшение диаметра отверстий для подвода и отвода охлаждающей воды и за счет интенсивного парообразования привести к взрыву водоохлаждаемой части печи. Автоклавы, являясь агрегатами, работающими под давлением, также представляют собой взрывоопасное оборудование. Они подлежат периодическому контролю со стороны Котлонадзора и должны работать при систематическом контроле давления. Особое внимание должно обращаться на исправность предохранительного клапана, посредством которого сбрасывается излишек пара и поддерживается тем самым постоянное давление, контролируемое манометром, и на состояние крепежных деталей крышек автоклава, являющихся наиболее слабым местом и подвергающихся наибольшему износу.

При подготовке сырья для изготовления неорганических теплоизоляционных материалов широко применяют тонкое измельчение, при котором образуется большое количество пыли. При грануляции минеральной ваты также образуются мельчайшие частицы, легко внедряющиеся в поры кожи или в слизистую оболочку дыхательных путей; введение синтетических связующих (фенольных) сопряжено с их частичным испарением и загрязнением воздуха токсичными продуктами.

Для создания нормальных условий работы обслуживающего персонала применяют следующие мероприятия: водяное или воздушное охлаждение печей, автоматическое регулирование их температурного режима; герметизацию всех пылящих и выделяющих вредные газы агрегатов, устройство местных отсосов с целью локализации очагов пылеобразования и выделения вредных газов.

Например, при производстве минераловатных изделий обязательно предусматривается разрежение в камерах волокноосаждения и тепловой обработки, а также герметизация ограждающих конструкций камер и других установок, в которых производится переработка ваты. Аппаратура, применяемая для приготовления синтетических связующих, также должна быть герметичной. Плавление битума должно производиться в битумоварочных котлах с закрытыми крышками.

Все технологическое оборудование, приводящееся в действие электричеством, должно иметь заземление или зануление, вращающиеся части должны быть ограждены; проходы между оборудованием должны быть свободными (не менее 1,5 м), там, где невозможно, оборудованы переходными мостиками.

Коренное улучшение условий труда может быть достигнуто за счет усовершенствования технологического процесса (автоматизации) и применения дистанционного управления.

ЧАСТЬ IV

ТЕХНОЛОГИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ ОРГАНИЧЕСКОГО СЫРЬЯ

На основе органического сырья производят довольно большое число разновидностей теплоизоляционных материалов и изделий, используя древесные отходы, торф, стебли различных растений, имеющие волокнистое строение, а также полимерные композиции. Все эти материалы, особенно газонаполненные пластмассы, находят широкое применение в строительстве. Материалы на основе древесины и местного сырья наиболее выгодно производить в регионах, богатых этими видами сырья. Газонаполненные пластмассы, являясь высокоэффективным теплоизоляционным материалом, находят все большее применение во всех регионах страны. Их производство неуклонно возрастает, опираясь на развитие химической промышленности, наращивающей выпуск необходимого сырья.

ГЛАВА 11

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСИНЫ

Как известно, древесина является ценнейшим сырьем, используемым в мебельной, целлюлозно-бумажной, химической промышленности, строительстве, особенно сельском. За последние десятилетия внимание к древесному сырью возросло, налаживается утилизация отходов древесины. Одним из путей использования неделовой древесины является производство из нее древесно-волокнистых плит различного назначения.

11.1. Древесно-волокнистые плиты

Древесно-волокнистыми плитами (ДВП) принято называть крупноразмерные листы, получаемые путем измельчения древесины в волокнистую массу, формования из нее изделий и их последующей тепловой обработки.

В основу деления плит на виды и марки положены средняя плотность и прочность при изгибе. В зависимости от средней плотности ДВП разделяют на виды: мягкие (М) со средней плотностью не более 350 кг/м³; полутвердые (ПТ) — не менее 400 кг/м³; твердые (Т) — не менее 850 кг/м³ и сверхтвердые (СТ) — не менее 950 кг/м³.

В зависимости от прочности при изгибе ДВП разделяют на марки: М-4; М-12; М-20; ПТ-100; Т-350; Т-400; СТ-500. В условном обозначении марки цифры отражают величину прочности при изгибе в кгс/см² или в МПа, если цифровые индексы уменьшены в 10 раз.

В данном учебнике рассматривается технология только мягких плит, применяемых для устройства теплоизоляционных и акустических конструкций.

Пористость ДВП регулируют в определенных пределах, изменяя тонкость помола древесного волокна, давление прессования и другие технологические факторы. У мягких плит пористость достигает 80%, а теплопроводность колеблется в пределах 0,053 ... 0,093 Вт/(м·°С).

Водостойкость всех видов ДВП невысока, но особенно она низка у мягких высокопористых плит. Водопоглощение мягких ДВП довольно значительное, за 2 ч оно достигает 12 ... 30%. Гигроскопичность при влажности воздуха 100% составляет 10 ... 12%.

При увлажнении ДВП разбухают, особенно у кромок, прочность их падает, а теплопроводность заметно увеличивается. Для придания плитам водоотталкивающих свойств в состав формовочной массы вводят гидрофобные вещества. В связи с тем что ДВП являются благоприятной средой для развития домовых грибков, в состав формовочных масс вводят антисептики, а для повышения огнестойкости — антипирены или покрывают поверхность плит огнезащитными составами.

Предельная температура применения ДВП — 100°С.

Сырьем для ДВП могут служить любые волокнистые материалы растительного происхождения, если их волокна достаточно длинные, гибкие и прочные: все виды древесины, стебли пшеницы, хлопчатника, кукурузы, кенафа и др. Однако основными видами сырья, широко используемыми в производстве, являются: неделовая древесина, т. е. непригодная для строительных и иных целей (долготье и коротье); отходы лесопиления (горбыль, рейка, вырезки); отходы спичечного и фанерного производства (шпон некондиционный, брак соломки и лом коробки); бумажная макулатура.

Целесообразность применения того или иного вида сырья зависит прежде всего от того, есть ли оно в данном районе, от стоимости, условий доставки к месту переработки.

Основное сырье — древесина — состоит из целлюлозы, лигнина и гемицеллюлозы, образующих оболочку клеток, а также из смол, эфирных масел, дубильных и красящих веществ, заполняющих клетки. Целлюлоза — химически стойкое вещество, не растворяющееся в воде и гидролизующееся при давлении 1 ... 1,5 МПа и температуре 180°С. Строение ее кристаллическое, состоит она из кристаллитов — мицелл в виде палочек длиной 500 ... 700 Å и тол-

щиной 50...60 Å. Мицеллы и фибриллы составляют клетки удлиненной волокнообразной формы. В древесине лиственных пород такие клетки, занимающие 60...65% объема, называют волокнами либриформа, их длина около 1 мм; в древесине хвойных пород содержание волокнообразных клеток — трахеид — длиной 3...10 мм достигает 90...95% по объему. Трахеиды длиннее, толще и прочнее, чем волокна либриформа, поэтому в производстве ДВП предпочтение отдается древесине хвойных пород.

Лигнин — аморфное вещество, представляющее собой сложное сочетание нескольких химических соединений. Химически он менее стоек, чем целлюлоза, но не гидролизуется. В производстве ДВП лигнин повышает выход массы и в процессе прессования способствует образованию дополнительных связей между волокнами. Гемицеллюлоза по составу близка к целлюлозе и состоит из пентозанов и гексозанов. Гексозаны при горячем прессовании гидролизуются и способствуют образованию смолоподобных продуктов.

Технология древесно-волокнистых плит довольно сложна и энергоемка. Процесс производства ДВП можно разделить на две практически самостоятельные части: получение древесных волокон путем последовательного измельчения древесины и переработка волокон в изделия.

Получение древесных волокон — процесс весьма многодельный и энергоемкий, он включает следующие последовательно осуществляемые операции: снятие коры с древесины (окоривание), распиловку дровяного долготья, колку толстых чураков, рубку древесины в щепку, размол щепы и получение волокнистой массы. Далее производят подготовку волокнистой массы путем ее сортировки, сгущения и проклейки.

Формование изоляционных ДВП осуществляют мокрым способом из гидромасс, который основан на свободном их обезвоживании с последующим вакуумированием и подпрессовкой. Производственный процесс заканчивается сушкой изделий. Принципиальная технологическая схема производства мягких ДВП приведена ниже.

Прочность мягких ДВП обеспечивается только за счет переплетения древесных волокон (свойлачиваемости), поэтому к древесному волокну для этого типа продукции предъявляют повышенные требования. Для обеспечения лучшей свойлачиваемости волокна должны иметь высокую удельную поверхность и быть достаточно длинными, поэтому в данном случае предпочтение отдается древесине хвойных пород.

Твердые ДВП в процессе изготовления подвергают горячему прессованию, при котором кроме образования плотных контактов между волокнами под действием высокой температуры образуются смолоподобные продукты, являющиеся связующим. Поэтому при получении твердых ДВП требования к древесным волокнам могут быть несколько снижены.

Технологическая схема производства мягких (изоляционных) ДВП

Неделовая древесина или отходы (склад)
↓
Окоривание древесины (корообдирочный барабан)
↓
Распиловка долготья (балансирные пилы)
↓
Раскалывание чураков (механические колуны)
↓
Приготовление щепы (рубильные машины)
↓
Получение волокна (дефибраторы, рафинеры)
↓
Получение гидромассы (массные бассейны)
↓
Сгущение гидромассы (сгустители)
↓
Проклейка гидромассы (массные бассейны) ← Проклеивающие вещества
↓
Формирование полотна (отливочные машины)
↓
Раскрой полотна на плиты (ножи продольной и поперечной резки)
↓
Сушка изделий (многоярусная сушилка)
↓
Механическая обработка (форматные станки)
↓
Склад готовой продукции

Приготовление щепы осуществляют из предварительно окоренной древесины. Окоривание поступившего на завод сырья (длинномерной древесины, коротья, отходов лесопиления и т. п.) производят в корообдирочных барабанах, водоструйных корообдирках или на ножевых корообдирочных станках. Кора ухудшает внешний вид изделия, увеличивает его водопоглощение при содержании ее в массе свыше 17% существенно снижает механическую прочность.

Освобожденная от коры древесина поступает на грубое измельчение. Длинноразмерную древесину распиливают дисковыми пилами с горизонтальной (балансирные пилы) или вертикальной (маятниковые пилы) качающейся рамкой. Толстые чураки раскалывают на дровокольных станках с неподвижным или движущимся поступательно-возвратно клином. Полученные заготовки длиной 1500 мм измельчают в щепу на специальных рубильных машинах, рабочим органом которых является массивный стальной диск толщиной 100 мм и более и диаметром до 3000 мм, на котором закреплены ножи. В зависимости от диаметра диска количество ножей может изменяться от 10 (при диаметре 2000 мм) и более. Диск приводится во вращение электромотором, его частота вращения 585 мин$^{-1}$.

Древесину легче рубить вдоль волокон, чем поперек, поэтому поленья подаются к диску под углом 35...45° по специальному наклонному лотку.

Для нормальной работы размольных агрегатов необходимо получать щепу одинаковых размеров: длина вдоль волокон 20...
...25 мм, поперек волокон 15...30 мм и толщина 3...5 мм. Из рубильной машины щепа выходит неодинаковая по величине, поэтому она сортируется на вибрационных плоских или барабанных ситах. Отсортированная щепа подается на мелкое измельчение к размольным агрегатам. Предварительно ее промывают в промывочном баке и затем на обезвоживающем винтовом конвейере, где щепу дополнительно промывают свежей водой.

Получение древесного волокна осуществляют одним из трех способов: механическим, термомеханическим или химико-механическим.

Необходимость размола заключается в получении тонких волокон с длиной, обеспечивающей хорошую свойлачиваемость при формировании ковра. Качество получаемого волокна (толщина и длина) зависит от породы применяемой древесины и способа его получения.

Качество волокна оценивается по скорости обезвоживания гидромассы. С учетом этого сконструирован прибор, с помощью которого по скорости свободного водоотделения определяют тонкость помола волокна в градусах Шопера-Риглера (°ШР) — автора прибора.

В зависимости от применяемого вида древесины, способа размола и типа размольной машины получаемое волокно может иметь средний диаметр 30...50 мкм и среднюю длину от сотых долей миллиметра до 3...4 мм. Слишком короткие волокна не могут быть использованы для получения мягких ДВП, поэтому выбор способа размола и типа размольной машины при их производстве имеет решающее значение.

Механический способ получения волокна основан на истирании чураков быстровращающимися рифлеными дисками без прогрева или с прогревом древесины, с применением химических веществ и других средств, облегчающих размол древесины. Процесс развертывания удельной поверхности древесно-волокнистой массы при этом способе размола связан с большой затратой энергии. Как правило, в размольные аппараты добавляют большое количество подогретой воды для облегчения размола и повышения выхода кондиционной волокнистой массы. Механический способ размола не нашел широкого применения вследствие больших затрат электроэнергии (800 кВт на 1 т сухой волокнистой массы) и невозможности переработки древесины в виде щепы.

Термомеханический способ размола древесины основан на двустадийной обработке щепы: предварительном разогреве ее горячей водой (не ниже 70°С) или паром высокого давления с температурой 170...190°С и последующем истирании ее между вращающимися с разной скоростью или в разные стороны рифлеными дисками. Разогрев щепы обычно производят в специальной камере размольной машины (дефибратора или рафинатора). Под воздействием теплоты и влаги лигнин древесины размягчается, ослабляя связи между волокнами; легко гидролизуемые углеводы гидролизуются и расщепление древесины на волокна существенно облегчается.

Древесное волокно, получаемое этим способом, характеризуется ненарушенной структурой при высокой тонкости помола. В зависимости от требуемой тонкости волокон размол осуществляют в одну или две стадии. При производстве мягких ДВП необходим двустадийный размол.

Для первичного помола применяют дефибраторы или быстроходные рафинеры — машины с быстровращающимися рифлеными дисками, а для повторного — рафинаторы, голлендеры, обеспечивающие тонкий размол при более мягком воздействии на древесину. Термомеханический способ наиболее распространен в практике приготовления древесно-волокнистой массы, для него характерно получение массы с высоким содержанием длинных и тонких волокон при сравнительно небольшом расходе электроэнергии (200...260 кВт на 1 т сухого волокна), что достигается за счет термовлажностной обработки щепы.

Химико-механический способ основан на различной растворимости компонентов древесины в слабом растворе щелочи и реализуется в два этапа: проваривание древесной щепы в слабощелочном растворе и механический размол проваренной щепы. При варке древесины в слабощелочном растворе происходит полное

постепенное растворение лигнина и частичное гимицеллюлозы и инкрустирующих веществ, соединяющих волокна. Это существенно облегчает размол древесины и обеспечивает получение эластичных длинных волокон, пригодных для производства высококачественных мягких плит.

Однако этот способ не получил широкого применения вследствие сложности химической подготовки сырья перед размолом и малого выхода волокна (до 80%).

Полученную при первичном размоле древесную массу разбавляют водой до концентрации 0,3 ... 0,5% и подвергают мокрой сортировке путем пропускания гидромассы через плоские сита с размером отверстий 5 ... 6 мм. Недомолотые частицы сгущают до 4 ... ... 5% и направляют на повторный размол. Гидромассу из кондиционных волокон направляют на вторичный помол, для которого широко используют голендоры непрерывного действия, в которых получают эластичное и хорошо гидратированное волокно.

Подготовка волокнистой массы для формования плит включает повышение концентрации волокон до 2,5 ... 3% с целью уменьшения емкости массовых бассейнов и снижения электроэнергии, потребной на ее перекачку, и проклейку массы.

Сгущение гидромассы производят в особых аппаратах — сгустителях, из которых ее затем перекачивают или направляют самотеком в массовые бассейны, оборудованные смесительными механизмами. Проклейку волокнистой массы (обработка ее эмульсиями химических веществ) производят при непрерывном перемешивании гидромассы для улучшения свойств готовых изделий. Прочность ДВП повышают введением в гидроволокнистую массу водных эмульсий окисляющихся масел (льняного, конопляного и др.) либо синтетических (фенолоформальдегидных и др.) смол. Повышения водостойкости достигают введением гидрофобных эмульсий, в основном парафиновой, канифольной, битумной, в количестве до 2%. Эмульсия осаждается на волокно в кислой среде (pH=4 ... 5); для получения такой среды в гидромассу вводят серную кислоту (1%) или сернокислый глинозем (0,5%). Повышения биостойкости ДВП добиваются введением в гидромассу антисептиков (фтористого и кремнефтористого натрия, крезола и др.). Огнестойкость повышают за счет введения антипиренов (сернокислого аммония, железоаммонитофосфата и др.).

Следует отметить, что введение перечисленных водорастворимых добавок эффективно при сухом способе производства ДВП, т. е. твердых их разновидностей. При мокром же способе (при получении мягких ДВП) эффект проклейки заметно снижается, так как при обезвоживании ковра во время формования изделий часть добавок уходит из массы с отжимными водами.

Формование мягких ДВП осуществляют на отливочных машинах непрерывного и периодического действия. Обезвоживание волокнистой гидромассы на отливочных машинах происходит последовательно путем свободной фильтрации воды через сетку, отсоса вакуумированием и отжима подпрессовкой.

При свободной фильтрации взвешенные в воде волокна сближаются и переплетаются, возникают силы сцепления друг с другом, т. е. происходит свойлачивание. При этом гидромасса обезвоживается и на сетке машины формируется ковер с относительной влажностью 90 ... 92%. Дальнейшее понижение влажности и уплотнение ковра происходят вакуумированием и отжимом (до влажности 60 ... 70%).

Наибольшее распространение для формования ДВП получили длинносетчатые отливочные машины непрерывного действия. Процесс формирования на этих машинах осуществляется следующим образом. Гидромасса через щель поступает на непрерывно движущуюся ленту отливочной машины, огражденную бортами. Для улучшения переплетения волокон на отливочных машинах устанавливают вертикальный вибратор. Свободная фильтрация воды прекращается при достижении концентрации волокна в массе 7 ... ... 10%, далее масса поступает в отсасывающую часть машины, оборудованную вакуум-насосами, где ее концентрация увеличивается до 12 ... 16%. Дальнейшее обезвоживание ковра происходит между двумя сетками в прессовой части машины, включающей несколько прессов с постепенно возрастающим давлением. Проходя через прессы, масса уплотняется, ее толщина уменьшается, а влажность достигает конечной величины 55 ... 70%. Отформованный таким образом ковер с помощью пил поперечной и продольной резки раскраивается на плиты заданных размеров, которые направляются на тепловую обработку.

Тепловую обработку мягких ДВП производят в трехзонных многоэтажных роликовых сушилках непрерывного действия, работающих по принципу противотока с рециркуляцией теплоносителя. Длина роликовых сушилок может колебаться от 30 до 90 м. Чаще используют сушилки длиной 30 м. Продолжительность сушки при температуре теплоносителя 130 ... 160°С составляет 3 ч. В конце сушки предусмотрена зона охлаждения.

Мягкие ДВП широко используют в сельском строительстве для утепления стен, полов и потолков щитовых панельных и каркасных домов. Их также применяют в качестве выравнивающих слоев под твердые покрытия полов и звукоизоляционных прокладок.

Следует отметить, что производство ДВП является энергоемким. В среднем на 1 т плит затрачивается 550 ... 650 кВт·ч электроэнергии, 4 ... 4,5 т пара и около 110 кг условного топлива. Высокая энергоемкость объясняется большими затратами электроэнергии, идущими на помол древесины. В процессе производства затрачивается значительное количество топлива на тепловую обработку сырья и сушку изделий. Высокие энергозатраты являются основной причиной стабилизации объемов выпуска ДВП.

11.2. Фибролит

Фибролит — плитный материал из опрессованной древесной шерсти, склеенной затвердевшим вяжущим. Известно довольно большое количество разновидностей фибролита, название которых отражает вид минерального вяжущего: магнезиальный, магнезиально-доломитовый, известковый, цементно-известковый, известково-трепельный, гипсовый, цементный. В настоящее время в СССР выпускают в основном цементный фибролит, который по назначению разделяют на теплоизоляционный, теплоизоляционно-конструкционный и акустический.

Свойства цементного фибролита характеризуют следующие основные показатели.

Пористость фибролита характеризуется неоднородным волокнистым строением с сообщающимися довольно крупными порами. С повышением средней плотности от 300 до 500 кг/м³ его пористость уменьшается от 87 до 77%.

Плотность и прочность цементного фибролита зависят от средней плотности, его подразделяют на марки: 300, 350, 400 и 500, причем выпуск марки 300 составляет около 80% от общего выпуска фибролитовых плит. Средняя плотность теплоизоляционного фибролита составляет 300 ... 400 кг/м³, акустического — 350 ... ... 400 и теплоизоляционно-конструкционного — 500 кг/м³. Средняя плотность фибролита зависит в основном от расхода вяжущего и усилия прессования. С увеличением средней плотности возрастает сопротивление изгибу и огнестойкость, а теплоизоляционные свойства ухудшаются. Прочность фибролита существенно зависит от размера и качества древесной шерсти и определяется расходом вяжущего, усилием прессования, режимом тепловой обработки и составляет при изгибе 0,4 ... 1,2 МПа.

Водостойкость фибролита недостаточна, поэтому его необходимо защищать от увлажнения. При увлажнении фибролитовых плит до 50% их механическая прочность снижается в 1,5 ... 2 раза. Водопоглощение возрастает с уменьшением средней плотности и расхода вяжущего. Обычно оно колеблется в пределах 35 ... 60%. К положительным качествам цементно-фибролитовых плит следует отнести их малую гигроскопичность и отсутствие склонности к короблению.

По теплопроводности фибролитовые теплоизоляционные плиты относят к среднему классу. Их теплопроводность колеблется от 0,079 до 0,115 Вт/(м·°С). Однако увлажнение плит в конструкции существенно ухудшает их теплоизоляционные свойства (при увеличении объемной влажности на 1% теплопроводность плит повышается от 5 до 14% в зависимости от средней плотности материала).

По огнестойкости фибролитовые плиты относят к трудносгораемым материалам — фибролит не горит, но тлеет. Время тления после удаления пламени для плит со средней плотностью 350 кг/м³ составляет 30 с.

В сухом состоянии фибролитовые плиты биостойки, они не подвержены действию грызунов и грибков. Однако при увлажнении свыше 35% плиты поражаются домовым грибом. Если плиты защищены от увлажнения, то их долговечность достаточно велика. Фибролит хорошо обрабатывается пилением, его можно сверлить, вбивать в него гвозди; плиты хорошо окрашиваются и оштукатуриваются.

Сырьевыми материалами для изготовления цементного фибролита являются древесина в виде древесной шерсти, цемент, минерализующие добавки и вода.

Древесную шерсть получают из неделовой древесины — дровяника, тонкомерного кругляка и отходов лесопиления без гнили с определенными допусками по кривизне и наличию сучков. При выборе древесины большое значение имеет наличие в ней водорастворимых веществ, вредно влияющих на процессы схватывания и твердения портландцемента. Взаимодействие древесины с цементом имеет некоторые особенности. Древесина представляет собой сложный комплекс органических веществ: целлюлозы, лигнина, гемицеллюлозы, экстрактивных и смолистых веществ, а также простейших водорастворимых сахаров и минеральных солей. При попадании в щелочную среду (которой является твердеющий цементный раствор, покрывающий древесную шерсть) гемицеллюлоза гидролизуется и переходит в простейшие водорастворимые сахара (сахарозу, фруктозу, глюкозу), которые являются сильнейшими «цементными ядами». Целлюлоза, лигнин, а также экстрактивные, смолистые вещества и минеральные соли влияния на процесс твердения цемента не оказывают. Продукты гидролиза гемицеллюлозы значительно замедляют твердение цемента, иногда до полного его прекращения, а также сильно (в 5 ... 10 раз) снижают прочность затвердевшего цемента. Для устранения вредного воздействия «цементных ядов» проводят специальную биохимическую, физическую и химическую обработку древесины.

Содержание водорастворимых веществ в древесине зависит от породы, части дерева, его возраста и времени рубки, а также от продолжительности вылеживания древесины на складе. Наименьшее количество водорастворимых веществ содержится в ели, затем идут пихта, тополь, сосна. Наиболее богаты ими береза, осина, бук. Поэтому древесную шерсть получают преимущественно из хвойных пород. В основании ствола содержится значительно больше водорастворимых веществ, чем в его середине. Древесина летней рубки значительно богаче ими, чем древесина зимней рубки.

Древесная шерсть — длинная тонкая древесная стружка длиной 200 ... 500 мм, шириной 2 ... 5 мм и толщиной 0,3 ... 0,5 мм. Применение древесной шерсти толщиной менее 0,3 мм приводит

к снижению прочности плит, а при толщине более 0,5 мм шерсть становится ломкой и менее эластичной.

Для изготовления фибролита обычно применяют портландцемент марки не ниже 400, быстротвердеющий портландцемент либо шлакопортландцемент. Наиболее пригодны быстротвердеющие цементы с содержанием C_3S более 60% и C_3A — не менее 12%, обеспечивающие быстрый рост прочности цементного камня.

Для нейтрализации вредного воздействия на цементный камень выщелачиваемых водорастворимых веществ и улучшения сцепления древесной шерсти с цементом древесную шерсть пропитывают растворами минеральных веществ — минерализаторов. Минерализаторами служат хлористый кальций, жидкое стекло и другие вещества. Вводят минерализатор в строго определенном количестве, так как избыток или недостаток его существенно понижает прочность цементного камня и, следовательно, готовых плит.

Производство фибролитовых плит может быть организовано по мокрому и сухому способам.

При мокром способе древесную шерсть окунают в ванну с водным раствором цемента и минерализатора с последующим удалением излишнего раствора на виброгрохоте. Этот способ требует постоянного перемешивания цементного раствора во избежание его расслоения, введения в формовочную массу большого количества воды, что отрицательно сказывается на качестве плит. Кроме того, цемент часто отверждается в ванне, что приводит к существенным его потерям и требует дополнительных затрат труда по очистке ванны.

В СССР и за рубежом наибольшее распространение получил сухой способ, включающий подготовку сырья, получение древесной шерсти, приготовление формовочной смеси, формование плит прессованием и их тепловую обработку.

Подготовка сырья заключается в следующем. Поступающую на завод древесину окоривают и отправляют на выдержку, чтобы устранить вредное воздействие «цементных ядов». Древесину выдерживают на открытом воздухе не менее 4...6 весенне-летних месяцев. В этот период под действием солнечных лучей и тепла происходит окисление экстрактивных веществ и перевод простейших водорастворимых сахаров и гемицеллюлозы древесины в менее растворимые формы. После выдержки древесину распиливают на чураки, удаляют гниль и другие пороки, затем чураки подают к древесношерстным станкам. Используемые для получения древесной шерсти станки имеют рабочий орган, работающий с возвратно-поступательным или вращательным движением ножей. Наибольшее распространение получили древесношерстные станки с возвратно-поступательным движением ножевой плиты. Строгальные ножи, укрепленные по торцам ножевой плиты, сострагивают шерсть параллельно волокнам древесины. Шерсть с перерезанными волокнами в процессе транспортирования укорачивается, и качество плит ухудшается. Полученную шерсть подсушивают до влажности 20...22% для уменьшения отрицательного воздействия водорастворимых веществ на цемент и улучшения условий минерализации шерсти (чем суше древесная шерсть, тем глубже раствор минерализатора проникает в поры и капилляры древесины, тем эффективнее минерализация).

Минерализацию древесной шерсти осуществляют путем ее окунания или обрызгивания 3...4%-ным водным раствором хлористого кальция или жидкого стекла. Для этого применяют различные устройства: шерстетрясы, конвейеры с перфорированной лентой, барабанные смесители. На шерстетрясах из древесной шерсти отсеивается мелочь и стряхивается излишек раствора минерализатора. Влажность минерализованной шерсти составляет 140... ...160%. Если в качестве вяжущего применяют белитовый цемент, содержащий незначительное количество C_3S, то обработка древесной шерсти минерализатором не нужна.

При приготовлении формовочной смеси учитывают соотношение между древесной шерстью и цементом, которое зависит от марки выпускаемых плит и вида древесной шерсти. Для каждого вида древесной шерсти существует рациональный расход цемента, соответствующий оптимальной толщине слоя цементного камня на поверхности ее элементов. Дальнейшее увеличение расхода цемента не приводит к эффективному росту прочности цементного фибролита, а лишь повышает его среднюю плотность. Уменьшение расхода цемента ухудшает скрепление лент древесной шерсти, снижает био- и огнестойкость готовых изделий. Средние значения расхода древесной шерсти, м³, и цемента, кг, следующие: для марки 300 — 0,4 и 190, для марки 400 — 0,55 и 240, для марки 500 — 0,82 и 270. Влажность смеси для получения плит хорошего качества должна поддерживаться в пределах 45...50%.

Смешивают компоненты формовочной массы в смесителях принудительного действия либо в смесителях свободного падения (гравитационных), обеспечивающих перемешивание шерсти без уплотнения и навивания ее на вал.

При формовании плит приготовленная формовочная масса загрузочным конвейером, оборудованным специальным валковым разделителем и разрыхляющим устройством, распределяется по формам и разравнивается валками или вручную. Формы устанавливают на многополочный пресс в виде пакета, при этом одновременно прессуют 15...20 плит. Для прессования применяют механические, пневматические или гидравлические прессы. Удельное давление при прессовании теплоизоляционных плит составляет 0,06...0,1 МПа; более тяжелые плиты прессуют при удельном давлении 0,25...0,4 МПа.

После достижения заданной степени уплотнения массы формы сжимают струбцинами (фиксируют толщину уплотненной массы) с целью исключения упругого последействия лент древесной шерсти. В таком обжатом состоянии формы с уплотненной массой подают на тепловую обработку.

Тепловая обработка фибролитовых плит осуществляется в два этапа. Вначале тепловую обработку плит производят в формах в обжатом состоянии с целью закрепления структуры, полученной при формовании. На этой стадии пакеты форм загружают в камеру твердения, где их выдерживают при влажности среды 60...…70% и температуре 30…35°С в течение 8 ч при использовании быстротвердеющего цемента и до 24 ч при применении обычного портландцемента. Затем плиты распалубливают, обрезают боковые и торцевые кромки и выдерживают под навесом на открытом воздухе (в летнее время) в течение 5…7 сут или в специальных сушилках при температуре 50…60°С и относительной влажности 60…70% в течение 1…2 сут. Влажность высушенных плит не должна превышать 20%. Готовые плиты отправляют на склад.

В СССР и за рубежом существуют автоматизированные линии для производства фибролитовых плит. Такая поточная линия работает следующим образом. От станков полученная древесная шерсть пневмотранспортом подается на перфорированный вибростол для минерализации и очистки от мелочи, после чего она поступает в смеситель для приготовления формовочной массы. Из смесителя формовочная масса ленточным транспортером подается к сбрасывающему барабану, который распределяет ее по металлическим формам, установленным на роликовом конвейере. Проходя под подпрессовочным барабаном, масса уплотняется. Установленный на потоке круглопильный станок разрезает образовавшийся ковер по зазору между торцевыми бортами смежных форм, после чего формы с массой подаются к пакетонаборному устройству, являющемуся одновременно прессом. После набора в пакет десяти форм осуществляется процесс прессования путем нагружения пакета плитой. Пакеты плит из пресса электропогрузчиком отправляются в камеры твердения, а набравшие прочность пакеты — из камеры к распределителю, с помощью которого пакеты разбираются на отдельные формы и конвейером подаются к распалубочному устройству. Из распалубочного устройства плиты поступают на обрезной станок и после обрезки торцов укладываются в штабеля по 20 шт. и электропогрузчиком отправляются под навес для подсушивания, а формы — на формовочный конвейер.

В СССР теплоизоляционные фибролитовые плиты выпускают размером 2400×550×75 мм. Плиты марки 300 применяют для утепления ограждающих конструкций щитовых и каркасных деревянных домов, сельскохозяйственных построек различного назначения, а также жилых, общественных и промышленных зданий в виде теплоизоляционного слоя в железобетонных стеновых панелях, облегченных фибролитоасбестоцементных панелей и т. п.

ГЛАВА 12

ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МЕСТНОГО СЫРЬЯ

Применение местного сырья для производства строительных материалов, и в частности теплоизоляционных, существенно уменьшает затраты, связанные с доставкой сырья к месту его переработки.

Для производства теплоизоляционных материалов применяют следующие виды местного сырья: торф, камыш, льняную костру, стебли хлопчатника, солому и т. п. Наиболее широко используют первые три вида сырья, переработка которых осуществляется в промышленных масштабах.

12.1. Торфяные теплоизоляционные изделия

Торфяные теплоизоляционные изделия изготовляют в виде плит, скорлуп и сегментов. Преимущественное распространение получили плиты размером 1000×1000×30 и 1000×500×30 мм. Плиты применяют для тепловой изоляции конструкций промышленных зданий, зданий холодильников и холодильных установок. Они также могут быть использованы для тепловой изоляции поверхностей промышленного оборудования и трубопроводов (скорлупы, сегменты) с температурой не более 100°С.

В зависимости от назначения торфяные теплоизоляционные изделия производят следующих типов: водостойкие, трудносгораемые, биостойкие, комплексные, обладающие двумя или тремя из указанных выше свойств, и обыкновенные. Выпуск этого вида изделий уменьшается в связи с сокращением сырьевой базы и закрытием ряда предприятий в Центральном районе РСФСР и Прибалтийских республиках. Основным производителем торфяных теплоизоляционных изделий является РСФСР (Северо-Западный, Уральский регионы).

Свойства торфяных плит определяются главным образом качеством торфа.

Пористость торфяных теплоизоляционных плит характеризуется однородной волокнистой структурой, составленной мелкими сообщающимися порами. Абсолютное значение пористости торфяных плит колеблется в пределах 84…91%.

Плотность и *прочность* во многом зависят от качества сырья. При производстве торфяных плит структура торфа нарушается незначительно, поэтому средняя плотность изделий близка к средней плотности торфа-сырца и колеблется от 170 до 260 кг/м^3. По средней плотности торфяные плиты относят к группе высокоэффективных теплоизоляционных материалов.

Прочность торфяных плит при изгибе составляет 0,3…0,5 МПа, что обеспечивает удовлетворительные условия для их транспортирования и монтажа.

Водопоглощение торфяных плит высокое. Их высокопористое строение способствует капиллярному подсосу и гигроскопическому увлажнению. Так, водопоглощение обычных плит (по массе) за 24 ч составляет 170...190%, а водостойких, получаемых при введении в формовочную массу гидрофобных добавок, —50%.

Теплопроводность торфяных плит в сухом состоянии составляет 0,052...0,075 Вт/(м·°С). Это объясняется их смешанной мелкопористой структурой и органическим происхождением твердой фазы.

Огнестойкость торфяных плит невелика. Они являются сгораемым материалом. Их температура воспламенения около 160°С, а самовоспламенения — около 300°С. В увлажненном состоянии при хранении в штабелях торфяные плиты склонны к микробиологическому самовозгоранию и при более низкой температуре, поэтому предельная температура хранения и эксплуатации торфяных плит ограничена 100°С. Однако она может быть повышена при введении в формовочную массу при ее переработке антипиренов.

Торф — основной сырьевой материал — является продуктом естественного отмирания и неполного распада болотных растений в условиях избыточного увлажнения, затрудняющих доступ воздуха. Для производства теплоизоляционного материала пригоден лишь слаборазложившийся (молодой) торф верхних слоев торфяников, сохранивший волокнистое строение торфообразующих растений. По ботаническому составу такой торф содержит в основном сфагнум-мох (русское название «белый мох»), который имеет большое количество разновидностей. Наиболее широко представлены две разновидности сфагнового мха: медиум-мох, наиболее часто встречающийся в торфяниках центральных областей РСФСР, и фуксум-мох, характерный для торфяников северо-западных и северных областей европейской части СССР, а также для болот Западной Сибири. Торф, используемый в производстве торфоплит, по ботаническому составу должен содержать мхи медиум и фуксум не менее 80% (по массе) при степени разложения 5...10, но не более 12%. Торф при степени разложения менее 5% плохо свойлачивается вследствие большой упругости волокон. При степени разложения выше 12% плохо отдает влагу; разложившаяся его часть в виде мелких частиц удаляется с отжимными водами, т. е. увеличиваются потери торфа.

Для получения торфяных теплоизоляционных плит часто используют торфяные залежи, сложенные из неоднородных видов торфа, но позволяющие путем смешивания торфа из отдельных горизонтов получать сырье со средней степенью разложения не более 12%. Торф в естественном состоянии характеризуется значительной влажностью 91...96%; его пористость составляет 96...
...97%. Слаборазложившийся торф в сухом состоянии имеет среднюю плотность 300...350 кг/м³.

Технология торфяных теплоизоляционных плит имеет разновидности. Плиты можно производить двумя способами: мокрым при исходной влажности торфа и сухим, когда торф предварительно подсушивают до влажности 40...50%. В настоящее время преимущественное распространение получил мокрый способ, обеспечивающий лучшее качество изделий. Мокрый способ получения торфоплит заключается в смешивании измельченного торфа с большим количеством воды и последующем удалении ее при прессовании и сушке изделий. Вода гидромассы придает пластичность волокнам торфа, способствует образованию равноплотного волокнистого каркаса и лучшей свойлачиваемости. Она также способствует водному гидролизу углеводов торфа при нагревании. Образующиеся водорастворимые продукты гидролиза повышают связность волокон торфа и тем самым прочность плит.

Подготовка сырья является важной технологической операцией, влияющей на качество изделий. Торф-сырец, доставляемый на предприятие с торфоразработок, должен иметь однородную массу и характеризоваться необходимой степенью разложения. Для этого в сырьевом отделении предприятия его усредняют, добавляя по необходимости торф различных возрастов; здесь же из торфа удаляют древесные и другие включения. Затем торф дробят («расчесывают») для увеличения удельной поверхности волокон. Эту операцию осуществляют в волк-машине, работающей по принципу зубчатой валковой дробилки. Зубчатые барабаны, вращаясь навстречу друг другу с различной окружной скоростью, превращают куски торфа в торфяную крошку.

Приготовление торфяной гидромассы включает следующие операции.

Измельченный в волк-машине торф поступает в варочные котлы, в которых происходят затворение его водой, тепловая обработка при температуре 50...55°С (варка гидромассы) и пропитка ее химическими веществами для улучшения качества изделий. Высокое водозатворение торфяной крошки (концентрация торфа в гидромассе не более 6%) способствует дополнительному расщеплению торфа на отдельные волокна, обеспечивает наибольшую однородность смеси и равноплотность получаемых изделий, а также получение мелкопористой структуры торфоплит. Варка гидромассы заключается в прогреве ее острым паром и выдерживании при заданной температуре в течение 20...30 мин. При этом обеспечивается улучшение условий расщепления волокон торфа и усиление свертывания коллоидов, что существенно облегчает обезвоживание плит при формовании и сушке. Для улучшения качества торфоплит в процессе варки гидромассы в нее вводят гидрофобизаторы (4...5% по массе, считая на сухой торф), антисептики (2...2,5%) и антипирены (10...15%).

Формование торфяных плит осуществляют в гидравлических прессах преимущественно карусельного типа. Для прессования используют металлические формы с сетчатыми поддонами. Удель-

ное давление прессования обычно составляет 0,2 МПа. В начальный момент прессования вся внешняя нагрузка воспринимается водой гидромассы. Затем вода отфильтровывается и внешняя нагрузка начинает воздействовать непосредственно на частицы торфа. В конце процесса прессования отжим воды прекращается и вся внешняя нагрузка воспринимается твердой фазой (торфом).

При интенсивном прессовании воздух, находящийся в торфяной массе, сжимается и способствует ускорению отжима воды, а сам, будучи в защемленном состоянии, не успевает удалиться. С увеличением продолжительности прессования часть защемленного воздуха замещается водой, количество газовой фазы в плите уменьшается, а влажность отпрессованной плиты увеличивается. Использование интенсивного прессования (кратковременного) вследствие имеющегося при этом упругого последействия воздуха позволяет существенно снижать влажность плит и сокращать расход теплоты на их сушку. Поэтому интенсивный режим прессования плит предпочтителен.

Тепловая обработка торфяных плит осуществляется для снижения их влажности с 80...85 до 5...10% путем испарения воды сушкой. При этом отдельные волокна торфа, сближаясь, склеиваются в местах контактов выделяющимися из торфа смолообразными продуктами. Сушат торфоплиты на поддонах в туннельных сушилках при максимальной температуре теплоносителя (воздуха или газовоздушной смеси) 150...160°С. Продолжительность сушки торфоплит зависит от их начальной влажности и составляет 24...32 ч. Расходы на сушку в общем балансе себестоимости составляют от 18 до 22%.

Обработку плит осуществляют после сушки. Торфоплиты отправляют на склад, где они остывают и приобретают присущую им равновесную влажность 12...15%. Затем их сортируют и обрезают неровные кромки. В случае изготовления пакетов плиты склеивают, нанося на поверхность расплавленный битум и сжимая плиты в винтовом прессе. Склеивая таким образом 2...3 плиты, получают пакеты толщиной 60...90 мм.

По данным ВНИИТеплоизоляции, средняя себестоимость 1 м³ торфяных теплоизоляционных плит в 1985 г. составляла 50 р. 72 к., а отпускная цена — 52 руб.

12.2. Льнокостричные плиты

Льнокостричные плиты по своим свойствам аналогичны древесно-волокнистым. Их применяют для тепловой изоляции ограждающих конструкций деревянных домов, покрытий промышленных зданий, а также в качестве утеплителя в стандартном домостроении. Толщину и количество слоев плит при устройстве тепловой изоляции устанавливают в зависимости от конструкции стен, покрытий и климатических условий района строительства.

Производство теплоизоляционных плит из льняной костры позволяет уменьшить расход древесины и снизить капитальные затраты при строительстве зданий на 9...10%. По данным ВНИИТеплоизоляции, объем производства льнокостричных теплоизоляционных плит в 1985 г. составил 15,6 тыс. м³ или 623,4 тыс. м². Себестоимость 1 м² плит находилась в пределах 0,7—0,75 руб.

Свойства льнокостричных теплоизоляционных плит определяются их строением.

Плотность и прочность льнокостричных теплоизоляционных плит, характеризующихся высокопористой структурой волокнистого строения, определяет основные эксплуатационные и функциональные их свойства. Средняя плотность невелика и составляет 200...220 кг/м³, т. е. по этому показателю их относят к эффективным теплоизоляционным материалам. Прочность при изгибе не ниже 0,4 МПа, что обеспечивает их транспортабельность и монтаж.

Водопоглощение плит в случае введения в формовочную массу гидрофобных добавок не превышает 20%; равновесная влажность составляет 12...15%.

Теплопроводность сухих плит не превышает, по данным ВНИИТеплоизоляции, 0,05 Вт/(м·°С), т. е. они являются низкотеплопроводным материалом.

Льнокостричные плиты — сгораемый материал, их температура применения не должна превышать 100°С.

Технология льнокостричных теплоизоляционных плит. В основу технологии льнокостричных плит положена способность костры превращаться в волокнистую массу при ее размоле в водной среде. Размол костры производят в голлендерах, рафинаторах и др. Для улучшения свойств изделий в формовочную массу вводят некоторое количество (5...7% по массе) грубого льняного волокна и в процессе помола проклеивают гидромассу гидрофобными добавками. Концентрация твердой фазы в готовой гидромассе находится в пределах 5...7%.

Изделия формуют на отливочной машине, снабженной гидравлическим прессом для частичного отжатия воды и уплотнения массы. Отжатая вода вовлекается в повторное производство. Плиты сушат в камерных или туннельных сушилках до влажности 15...20% в течение 24 ч при максимальной температуре теплоносителя 100...130°С и после обрезки направляют на склад готовой продукции.

12.3. Камышитовые теплоизоляционные изделия

Камышит — плитный материал, изготовляемый из стеблей камыша (тростника обыкновенного) путем прессования и скрепления в спрессованном состоянии стальной оцинкованной проволокой.

В настоящее время выпускают около 8,3 млн. м² камышитовых изделий преимущественно в виде плит прямоугольной формы, которые применяют для утепления стен перегородок, перекрытий и покрытий малоэтажных зданий, а также в комбинированных ограждающих конструкциях в сочетании с кирпичом, бетоном и другими материалами. Для предотвращения гниения камышитовые плиты пропитывают 5%-ным раствором железного купороса. Поверхности камышитовых стен для уменьшения воздухопроницаемости оштукатуривают.

Производство камышитовых изделий организовано в регионах страны, богатых зарослями тростника обыкновенного, камыша озерного, рогоза и некоторых других водолюбивых растений. К таким регионам относятся Поволжье, Северный Кавказ, Западная Сибирь, Приднепровье, Молдавия, Узбекистан, Казахстан, Туркменистан. Заросли камышовых растений занимают в СССР площадь около 5 млн. га. Ежегодно естественно возобновляемый урожай этих растений составляет примерно 35 млн. т. Для производства камышитовых изделий используется лишь около 1% этих ресурсов.

Основные свойства камышитовых плит. Камышитовые плиты выпускают следующих размеров, мм: длина 2000...
...3000, ширина 800...1000, толщина 50...100. Расположение стеблей растений характеризуются неоднородным волокнистым строением с сообщающимися крупными и мелкими порами. Средняя плотность плит зависит от усилия прессования и вида используемого сырья, она колеблется от 175 до 250 кг/м³. Предел прочности при изгибе — около 0,5 МПа; теплопроводность плит в зависимости от степени уплотнения и вида сырья колеблется от 0,058 до 0,093 Вт/(м·°С). Влажность камышитовых плит не должна превышать 18%. Камышит при увлажнении поражается грибами; при открытом пламени не горит, но тлеет.

Требования к сырьевым материалам. При выборе сырья большое внимание обращают на гибкость стебля и пористость растительной ткани, обеспечивающих упругость и низкую теплопроводность камышитовых плит.

Для производства плит используют зрелый тростник (камыш) урожая первого года с толщиной стебля преимущественно 7...
...15 мм, желтого цвета без листьев, гнили и плесени. Тростниковые растения заготавливают осенью на незамерзших водоемах плавучими камышекосилками, а на замерзших — специальными камышеуборочными машинами. Для скрепления (прошивки) плит используют стальную оцинкованную проволоку диаметром 1,6...
...2 мм.

Изготовление камышитовых плит. Для изготовления камышитовых плит используют прессы различных конструкций. Плиты с поперечным расположением стеблей изготовляют на горизонтальных прессах ПКТР-3 и АКС, а с продольным расположением стеблей — на вертикальной передвижной установке ПВ-1000 конструкции ВНИИСельстроя. Подавляющее большинство заводов и цехов производят плиты с продольным расположением стеблей, так как такой тип плит более экономичен по расходу сырья.

Изготовление камышитовых плит на установке ПВ-1000 осуществляют следующим образом. Ленточный конвейер подает стебли растений с загрузочной площадки установки к маятниковой (циркульной) пиле, обрезающей стебли на определенную длину. Нарезанные стебли поступают в устройство предварительной подпрессовки, а затем в вертикальную камеру для окончательного прессования, прошивки спрессованного пакета проволокой и опиливания боковых сторон. Непрерывную камышитовую плиту, выходящую из пресса, разрезают на плиты требуемых размеров.

Установка ПВ-1000 характеризуется высокой производительностью, пониженной материало- и энергоемкостью, высокой выработкой продукции на одного рабочего. Предприятия по изготовлению камышитовых плит могут быть стационарными производительностью 100...300 тыс. м²/год и передвижными, объединяемыми в заводы производительностью до 1,5 млн. м²/год. Себестоимость камышитовых плит, получаемых на передвижных заводах, составляет 55...60% от себестоимости плит, получаемых на стационарных предприятиях. Средняя себестоимость 1 м² камышитовых плит в 1985 г., по данным ВНИИТеплоизоляции, составила 0,74 руб.

ГЛАВА 13

ПОЛИМЕРНЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ (ГАЗОНАПОЛНЕННЫЕ ПЛАСТМАССЫ)

Газонаполненные пластмассы представляют собой двухфазные системы, состоящие из полимерной матрицы и относительно равномерно диспергированной газовой фазы.

Промышленное производство газонаполненных пластмасс освоено сравнительно недавно, в крупном масштабе эти материалы выпускают с конца 50-х годов. За одиннадцатую пятилетку имел место существенный рост объема их выпуска. Так, к 1985 г. объем выпуска составил свыше 12% от общего объема выпуска теплоизоляционных материалов. Такой значительный рост производства (более чем на 68% за пятилетку) можно объяснить тем, что газонаполненные пластмассы характеризуются комплексом высоких свойств: относительно высокой прочностью при малой средней плотности, самой низкой теплопроводностью, высокой водостойкостью, биостойкостью.

13.1. Виды и свойства газонаполненных пластмасс

Полимерные теплоизоляционные материалы по характеру пористости разделяют на ячеистые или пенистые пластмассы (пено-

пласты), характеризующиеся преимущественно замкнутыми порами ячеистого строения; пористые пластмассы (поропласты), пористая структура которых сложена в виде системы сообщающихся ячеек или полостей; сотовые пластмассы (сотопласты), пористость которых представлена геометрически правильными пустотами (сотами), получаемыми целенаправленной переработкой исходного пластического материала без его вспенивания.

Деление газонаполненных пластмасс на пено- и поропласты условно, так как во многих случаях ячеистая и сообщающаяся пористость образуется одновременно в едином процессе поризации.

В зависимости от значений модуля упругости полимерные теплоизоляционные материалы разделяют на жесткие, полужесткие и эластичные. К жестким материалам, наиболее широко используемым для строительной теплоизоляции, относят газонаполненные пластмассы, имеющие прочность при сжатии (при 10%-ной деформации) более 0,15 МПа, эластичные — менее 0,01 МПа. Полужесткие материалы характеризуются промежуточными показателями прочности.

Газонаполненные пластмассы классифицируют также по природе и химическому строению полимеров, составляющих основу материала, технологии, функциональному назначению.

В зависимости от вида полимера пенопласты подразделяют на термопластичные, получаемые на основе полимеров с линейными и разветвленными молекулами (пенополистирол, пенополивинилхлорид, пенополипропилен и др.); термореактивные, получаемые на основе полимеров с пространственной структурой молекул (фенолоформальдегидные, мочевиноформальдегидные, ненасыщенные полиэфиры, эпоксидные, полиуретановые, кремнийорганические, фурановые).

Из термопластичных полимеров, размягчающихся при нагревании, можно получать газонаполненные материалы самыми различными способами. Выбор того или иного способа и технологические параметры получения вспененных материалов зависят в основном от температуры размягчения исходного полимера.

Более сложно получение газонаполненных пластмасс из термореактивных полимеров или продуктов частичной поликонденсации. Для получения высококачественных пористых материалов в этом случае необходимо проводить процесс вспенивания на той стадии, когда в полимере образовалось еще сравнительно мало поперечных межмолекулярных связей, т. е. когда полимер не потерял еще способности к размягчению и течению при соответствующих температурах и давлениях. Отверждение, т. е. процесс образования трехмерной структуры, должно проходить уже во вспененном полимере.

По способу получения газонаполненные пластмассы подразделяют на две большие группы: прессовые, изготовляемые в условиях обжатия (давления) извне, и беспрессовые, получаемые без воздействия внешнего давления. В свою очередь, беспрессовые

пенопласты по технологическим признакам можно подразделить на следующие группы: а) заливочные пенопласты, получаемые вспениваем жидких исходных композиций газами, выделяющимися из массы; б) пенопласты, получаемые вспениванием водных растворов, эмульсий или суспензий полимеров путем механического диспергирования газов и последующего отверждения композиции; в) пенопласты, получаемые путем омоноличивания (спекания) предварительно вспененного гранулированного полимера (например, пенополистирола); г) пенопласты, образующиеся при вспенивании твердых смоляных композиций с помощью газообразователей (например, пенопласты на основе твердых новолачных фенолоформальдегидных смол).

Газонаполненные пластмассы, получаемые в условиях обжатия (давления), также подразделяют на несколько групп: а) пенопласты, получаемые путем прессования смеси полимера с газообразователем при повышенной температуре с последующим вспениванием размягченной композиции в пресс-форме или вне пресса (прессовый способ); б) пенопласты, получаемые выдавливанием через нагретое сопло или щель размягченного полимера, насыщенного под давлением газами, газообразными продуктами разложения порофоров или парами низкокипящих жидкостей (экструзионный способ); в) пенопласты, получаемые впрыскиванием под давлением в холодную форму размягченной полимерной композиции, насыщенной газами или низкокипящими растворителями (литье под давлением); г) пенопласты, получаемые путем насыщения полимерной размягченной композиции газами или низкокипящими растворителями под давлением с последующим вспениванием массы при снижении давления среды (автоклавный способ). Эти методы применяют для получения изделий из газонаполненных пластмасс при использовании термопластичных полимеров, изменяющих многократно свои реологические свойства в зависимости от температуры нагрева.

По функциональному назначению пенопласты делят на теплоизоляционные, используемые в виде плит и скорлуп в холодильной технике, для изоляции химической аппаратуры, изотермических вагонов, в кровельных и стеновых конструкциях зданий; конструкционно-теплоизоляционные, используемые в виде ограждающих конструкций, в том числе в слоистых конструкциях в качестве монтажной теплоизоляции трубопроводов. Особенно эффективны слоистые конструкции: они легки, технологичны, обладают необходимыми прочностью и жесткостью. Применение слоистых конструкций в строительстве помогает разрешить издавна существующее противоречие между несущей способностью конструкции и ее теплотехническими свойствами.

В последние 10...15 лет в практике строительства находят все более широкое распространение композиционные пенопласты, в состав которых входят различные зернистые минеральные пористые заполнители. Эти материалы выделены в отдельную группу — наполненных пенопластов.

Специфические особенности газонаполненных пластмасс определяют техническую направленность и экономическую эффективность их применения в различных отраслях промышленности. Благодаря низкой средней плотности, высоким теплоизоляционным свойствам, повышенной удельной прочности, а также ряду ценных технологических и эксплуатационных свойств пенопласты не имеют аналогов среди традиционных строительных материалов.

Однако большинству газонаполненных пластмасс свойственны определенные недостатки, существенно ограничивающие возможности их применения. К этим недостаткам прежде всего следует отнести пониженные огнестойкость, теплостойкость и температуростойкость. Кроме того, высокая себестоимость и ограниченность сырьевой базы обусловливают экономическую целесообразность применения пенопластов в основном для высокоэффективной теплоизоляции: в легких кровельных конструкциях; легких стеновых панелях и монтажной теплоизоляции трубопроводов.

Основные свойства газонаполненных пластмасс определяются главным образом видом полимерных композиций.

Пористость и средняя плотность пенопластов определяются прежде всего относительным содержанием в них полимерной и газовой фаз, видом полимера и характером пористой структуры: геометрической формой и размерами пор, соотношением замкнутой и сообщающейся пористости. Пенопласты, выпускаемые промышленностью, характеризуются полифракционным распределением пор по размерам. Такие характеристики пористой структуры, как форма и размер пор, толщина полимерных пленок (межпоровых перегородок), колеблются в объеме материала в широких пределах. Эти колебания носят как закономерный, обусловленный составом композиции и параметрами технологии, так и случайный характер. В табл. 13.1 приведены характерные параметры ячеистой структуры некоторых наиболее широко распространенных пенопластов.

Таблица 13.1. Характеристики пористой структуры пенопластов

Полимер	Плотность полимера, г/см³	Средняя плотность пенопласта, кг/м³	Средний диаметр пор, мм	Толщина межпоровых перегородок, мкм
Полистирол	1,05	16 ... 25	0,92 ... 0,2	0,5 ... 18
Поливинилхлорид	1,38	50 ... 220	0,1 ... 0,3	5,0 ... 250
Полиуретан	1,2	50 ... 200	0,1 ... 2,5	5,0 ... 120
Фенолоформальдегидная смола	1,2 ... 1,3	20 ... 200	0,2 . . 5,0	1,5 ... 300

Наиболее равномерной мелкоячеистой структурой характеризуются пенопласты на основе термопластичных полимеров, получаемые по прессовой технологии. В этом случае регулярность пористой структуры достигается главным образом за счет применения предварительного механического диспергирования и гомогенизации исходных компонентов.

Наиболее мелкодисперсная и равномерная структура образуется у полиуретановых и полиэпоксидных пенопластов. Для фенольных же пенопластов характерна вытянутость пор в направлении вспенивания, что предопределяет анизотропию их свойств, причем вытянутость пор увеличивается по мере снижения средней плотности пенопластов.

Структурообразование пенопластов весьма чувствительно к изменению технологических параметров и рецептур исходных композиций. Характер структуры пенопластов может существенно меняться при незначительных изменениях технологических режимов или составов исходных композиций. Эти особенности эффективно используют для направленного регулирования структуры. Особенно эффективно применение поверхностно-активных веществ, введение которых в состав исходной композиции позволяет влиять не только на размеры образующихся пор, но и на степень их замкнутости и получать изделия с преимущественно замкнутой или сообщающейся пористостью.

Средняя плотность пенопластов зависит как от вида исходного полимера, так и от количества введенного в него газообразователя или вспенивающего агента. Однако для каждого вида полимера существует свой предел увеличения газообразующих (вспенивающих) добавок, превышение которого не приводит к возрастанию общей пористости. Обычно средняя плотность пенопластов колеблется по высоте и объему изделия. Степень разноплотности изделий главным образом зависит от способа получения пенопласта и условий порообразования. Наиболее заметно она проявляется в пенопластах заливочного типа, так как условия структурообразования и перераспределения теплоты по объему вспенивающейся композиции в таких материалах существенно влияют на пористость. Например, при вспенивании фенолоформальдегидной композиции в замкнутом объеме готовый пенопласт имеет поверхностную уплотненную пленку («пристенный слой»), тогда как при свободном вспенивании той же композиции средняя плотность по высоте изделия уменьшается. Причиной образования уплотненного поверхностного слоя является нарушение теплового равновесия в процессе структурообразования пенопласта вследствие высокой теплопроводности материала формы. Предварительный нагрев формы возволяет существенно уменьшить толщину уплотненного слоя.

Физико-механические свойства, т. е. поведение пенопластов при воздействии на них механических нагрузок, обусловлены характеристиками их пористой структуры и свойствами исходного полимера, его природой. Мелкопористые пенопласты с преобладанием замкнутых пор отличаются большей механической прочностью, чем крупнопористые материалы и материалы с преимущественно сообщающимися порами, полученные из одного и того же исходного полимера (композиции). В условиях напряженного состояния у пе-

нопластов наблюдаются резко выраженные отклонения как от свойств идеально упругих тел, для которых в соответствии с законом Гука напряжение прямо пропорционально деформации и не зависит от ее скорости, так и от свойств идеально вязких жидкостей, для которых напряжение прямо пропорционально скорости деформации и не зависит от самой деформации. Для пенопластов характерны вязкая упругость и замедленное деформирование во времени. Поэтому рассмотрение вопросов разрушения пенопластов сводится к анализу их деформативности. При сжатии в пенопластах в большинстве случаев отсутствует хрупкое разрушение и, следовательно, четко выраженная характеристика прочности. Поэтому показатель прочности определяют условно при заданной деформации материала (при 2 или 10%-ной относительной деформации).

Наиболее высокими прочностными показателями обладают прессовые полистирольные пенопласты и винильные пенопласты. Варьирование рецептур полиуретановых композиций в весьма широких пределах позволяет получать пенопласты этого вида с различными прочностными и упругими свойствами, соответствующими назначению тех или иных изделий. Фенольные пенопласты характеризуются повышенной хрупкостью, что объясняется особенностями химического строения фенолоформальдегидных смол. Их макромолекулы, состоящие из фенольных ядер, связанных короткими малоподвижными мостичными связями, имеют малую подвижность элементарных звеньев. Вязкость этих смол повышают путем совмещения их с нитрильными каучуками или пластифицирующими агентами. К хрупким пенопластам, характеризующимся невысокой прочностью, относятся мочевиноформальдегидные пенопласты.

Теплопроводность газонаполненных пластмасс — наиболее эффективных теплоизоляционных материалов — значительно ниже, чем других теплоизоляционных материалов и составляет 0,023... 0,045 Вт/(м·°С). Теплопроводность пенопластов зависит от ряда факторов: средней плотности, природы исходного полимера и в очень сильной степени от природы газа, заполняющего поры материала. Для каждого вида пенопласта существуют оптимальные значения средней плотности, отклонения от которых в ту или иную сторону приводят к повышению теплопроводности. При чрезмерном снижении средней плотности неизбежно возрастает количество сообщающихся пор и, следовательно, увеличивается перенос теплоты конвекцией. Отклонение от оптимума в сторону увеличения средней плотности приводит к снижению общей пористости и также к увеличению теплопроводности материала. Природа исходного полимера (композиции) оказывает незначительное влияние на теплопроводность пенопласта при прочих равных условиях. Зато природа газа, заполняющего поры материала, оказывает очень существенное влияние на этот показатель. Например, теплопроводность пенополиуретана со средней плотностью 50 кг/м³, изготовленного путем вспенивания трифгортрихлорэтаном (фреоном-113), составляет при 20°С 0,02 Вт/(м·°С), а для вспененного парами воды — 0,035 Вт/(м·°С),

т. е. в 1,5 раза выше. Однако со временем в результате диффузии газов происходит замещение фреона воздухом и соответственно повышается теплопроводность материала. В частности, через два года эксплуатации теплопроводность пенополиуретана с замкнутыми порами возрастает на 20%. Это необходимо учитывать при расчете теплофизических характеристик конструкций при использовании такой изоляции.

Значительное влияние на теплопроводность пенопластов оказывает влажность. При этом в материалах с открытой сообщающейся пористостью это влияние значительно выше, т. е. водопоглощение и гигроскопичность пенопластов, являясь критерием их увлажняемости, влияют на изменение теплопроводности пенопластов, служащих в условиях повышенной влажности. Характерно, что в материале с открытой сообщающейся пористостью (рис. 13.1, кривая *1*) влияние влажности на теплопроводность выше, чем в материалах с замкнутой пористостью (кривые *2* и *3*). Объясняется это тем, что вода заполняет прежде всего мелкие поры, образуя тем самым мостики с повышенной теплопередачей.

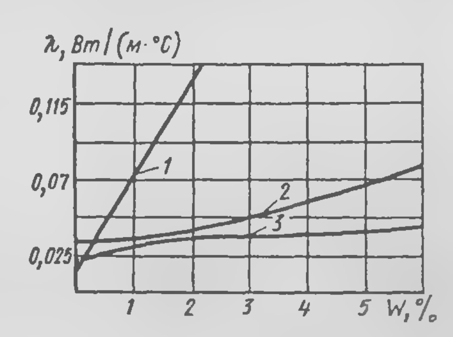


Рис. 13.1. Зависимость теплопроводности от влажности пенопласта:

1 — мочевиноформальдегидный пенопласт; *2* — фенольный пенопласт; *3* — полистирольный пенопласт

Водопоглощение и гигроскопичность пенопластов зависят от ряда факторов: химической природы полимера, характера пористой структуры, средней плотности, особенностей технологии и продолжительности увлажнения. Повышенным водопоглощением обладают пенопласты с открытой сообщающейся пористостью (мочевиноформальдегидные, фенольные). После 24 ч пребывания в воде водопоглощение мочевиноформальдегидных пенопластов достигает 1200% по массе. Водопоглощение заливочных пенопластов благодаря образованию на их поверхности тонкого плотного слоя несколько ниже. Полное водонасыщение наступает через 120 сут и составляет 80...90% по объему. У заливочных полиуретановых и поливинилхлоридных пенопластов, характеризующихся преобладанием замкнутой ячеистой пористости, водопоглощение невысокое.

Сорбционная влажность пенопластов возрастает с уменьшением средней плотности и увеличением относительной влажности воздуха. Процесс сорбции водяного пара происходит в такой последовательности: при малых значениях относительной влажности водяного пара ($W_{отн}<20\%$) на поверхности твердой фазы образуется мономолекулярный слой адсорбционной воды; с повышением $W_{отн}$ до 80% образуется полимолекулярный слой сконденсировавшегося

пара, при $W_{отн}>80\%$ наблюдается резкое увеличение влажности материала вследствие интенсивного проникновения влаги в поры материала из-за капиллярной конденсации. В условиях повышенной влажности воздуха и при контакте с водой имеет место изменение механических свойств пенопластов. Прочность при сжатии термопластичных пенопластов снижается в результате увлажнения в течение 20 сут на 8...18%, а фенольных до 1,5...2 раз.

Теплостойкость и температура применения пенопластов при эксплуатации в условиях повышенных температур определяет их формостабильность. Условно за характеристику теплостойкости пенопластов принимают температуру, при которой линейная усадочная деформация материала за 24 ч не превышает 1%. Технической характеристикой теплостойкости является показатель рабочей температуры, при которой материал продолжает еще сохранять свои эксплуатационные свойства, а усадочные деформации не превышают заданных значений. Как правило, деформативность пенопластов при повышенных температурах изменяется в большей степени, чем прочность. При повышенных температурах под действием механических нагрузок возрастают эластические и пластические деформации пенопластов. При этом характер влияния повышенных температур на деформируемость и механические свойства пенопластов главным образом зависит от природы полимерной основы. Пенопласты на основе термореактивных смол обладают более стабильными механическими свойствами; при кратковременных воздействиях нагрузки они формостабильны до температур, близких к их термической деструкции (180...200°С). Наиболее теплостойки мочевиноформальдегидные пенопласты (температура эксплуатации до 200°С); у фенольных пенопластов — до 150°С; у пенополиуретанов — 90...120°С. Высокой стабильностью механических характеристик при продолжительном воздействии повышенных температур (250°С) характеризуются кремнийорганические пенопласты.

У пенопластов на основе термопластичных смол интенсивно снижаются механические свойства вблизи температуры стеклования. Поэтому их можно применять в качестве конструкционных материалов при температуре не выше 75°С. При более высоких температурах существенно увеличиваются их эластические свойства. Например, механические характеристики полистирольных пенопластов при температуре 60°С снижаются до 30...40%. При отрицательных же температурах механические характеристики термопластичных пенопластов повышаются на 20...30% из-за повышения хрупкости полимеров.

Горючесть пенопластов зависит от вида каркасообразующего полимера. В связи с этим пенопласты различно реагируют на воздействие огня: одни поддерживают горение, другие после удаления пламени тлеют и затухают, третьи не горят, но плавятся. Например, полистирольные пенопласты легко загораются и полностью сгорают со значительным дымовыделением. В настоящее время промышленность выпускает самозатухающие полистирольные пенопласты, в состав которых введены антипирены. Для возгорания их требуется более длительное воздействие огня. Поливинилхлоридные пенопласты при вынесении из пламени тлеют, а затем затухают. Пенополиуретаны, наоборот, горят с выделением токсичных продуктов горения. В настоящее время разработано большое количество антипиренов (органические галоид и фосфорсодержащие соединения, аммонийные соли различных кислот и т. д.), включение которых в рецептуры полимерных композиций снижает опасность возгорания пенопластов и способствует их самозатуханию.

Эксплуатационная стойкость теплоизоляционных материалов в строительных конструкциях определяется типом конструкций и климатическими условиями района строительства. Основными агрессивными факторами для утеплителей ограждающих конструкций являются длительное воздействие повышенных температур, влажность окружающей среды, число переходов через 0°С (циклы замораживания и оттаивания). При длительном воздействии повышенных температур, кислорода воздуха, света и т. д. в полимерах протекают различные физические (термическая, механическая, фотохимическая деструкция) и химические процессы, которые могут привести к существенному ухудшению свойств пеноматериалов в связи с уменьшением молекулярной массы полимеров, образованием свободных радикалов и уменьшением длины цепей макромолекул.

Наиболее важным фактором, определяющим длительную термостойкость полимеров, является величина энергии связи между атомами в главной цепи. Одна из наиболее устойчивых к термическим воздействиям углерод — углеродная связь (С—С), на прочность которой влияют степень разветвленности полимеров и наличие заместителей в макромолекуле. Разветвленные полимеры всегда менее термостойки, чем неразветвленные. Этим объясняется, например, более низкая термостойкость поливинилхлоридных пенопластов. Термостойкость пенопластов можно повысить, варьируя рецептуры композиций, регулируя плотность сшивки полимера изменением числа поперечных связей.

Перспективным направлением переработки полимеров является их стабилизация — сохранение исходных свойств полимеров при различных воздействиях. Это может быть достигнуто введением в композицию стабилизаторов, предотвращающих старение полимеров в условиях эксплуатации. Вследствие многообразия процессов, протекающих при разрушении полимеров, стабилизация различных полимеров не может быть реализована единым приемом. Для каждого полимера должны применяться свои стабилизаторы. Но так как все реакции распада являются цепными, то для их замедления могут быть использованы три общих метода: подавление цепных реакций, развивающихся в процессе термоокислительного распада; создание условий, при которых образующиеся вещества препятствуют более глубокому разложению полимера; создание условий, при которых распад протекает обратимо.

Попеременное увлажнение и высушивание наиболее интенсивно снижает прочностные и упругие свойства пенопластов — до 40% в зависимости от вида полимерной основы. Циклическое замораживание и оттаивание также негативно влияет на механические показатели пенопластов. В зависимости от вида полимера после 25 циклов испытаний прочность при сжатии снижается на 10...25%.

13.2. Общие технологические принципы получения газонаполненных пластмасс

Ячеистая (пористая) структура полимерных теплоизоляционных материалов создается при их изготовлении с помощью газо- или пенообразующих веществ (пено- и газообразователей). От правильного их выбора при получении пенопластов во многом зависят качество материалов, технологические параметры переработки композиций в пенопласты и способ получения материалов.

Газообразователи (их еще называют вспенивающими веществами) по агрегатному состоянию подразделяют на твердые, жидкие и газообразные. По механизму процесса газовыделения твердые и жидкие газообразователи можно классифицировать следующим образом: газообразователи, выделяющие газообразные продукты вследствие необратимого термического разложения; обратимого термического разложения; химического взаимодействия компонентов; термической десорбции (выделение ранее поглощенных газов) — адсорбенты; кипения или снижения давления (легкокипящие жидкости).

По химической природе газообразователи можно разделить на органические и неорганические.

Газообразователи должны удовлетворять следующим требованиям: 1) температурный интервал максимального (наиболее интенсивного) газообразования должен находиться вблизи температуры полного размягчения данной полимерной композиции; 2) газообразователь должен хорошо распределяться в полимерной композиции; 3) газообразователь и продукты его разложения не должны оказывать влияния на скорость отверждения полимера; 4) термическое разложение газообразователя должно протекать равномерно и постепенно с выделением газа в количестве, близком к теоретическому; 5) разложение газообразователя не должно сопровождаться выделением теплоты, способной вызвать деструкцию полимера; 6) при температурных режимах переработки полимерных композиций в поропласты газообразователь и продукты его разложения не должны вступать в реакцию с полимером или вызывать коррозию технологического оборудования; 7) газообразователи должны быть доступными, дешевыми и устойчивыми при транспортировании и хранении; 8) газообразователи и продукты их разложения не должны быть токсичными

К газообразователям, выделяющим газ вследствие необратимого разложения, относят различные органические вещества (порофоры), которые при нагревании до данной определенной температуры разлагаются с выделением газов N_2, CO_2, NH_3 и др. По химическому строению порофоры можно разделить на следующие группы: азосоединения ($R—N{=}N—R'$); сульфонилгидразиды ($R—SO_2NH—NH_2$); нитрозосоединения ($R—N(NO)—R'$); азиды кислот ($R—CON_3$) и некоторые другие соединения.

Эти вещества хорошо измельчаются и совмещаются с полимерами. Однако они имеют и существенный недостаток — токсичность продуктов разложения. Кроме того, они сравнительно дороги и могут снижать теплостойкость пенопластов ввиду пластифицирования полимера продуктами разложения.

В СССР для производства пенопластов наиболее широко применяют порофоры ЧХЗ-57 (азоизобутиронитрил), ЧХЗ-21 (азодикарбонамин), 5 (парауретиланфенилсульфонилгидразид), 18 (динитрозопентаметилентетрамин). Кроме них применяют порофоры ДАБ, 254, БСГ, ДФ-4 и др.

К газообразователям, выделяющим газ вследствие обратимого термического разложения, относят неорганические вещества — карбонаты. Их основными преимуществами являются дешевизна, доступность, а также то, что продукты их разложения не оказывают пластифицирующего действия на полимер и, следовательно, на теплостойкость пенопластов. Их главный недостаток — плохое совмещение с полимером, что затрудняет их равномерное распределение в композиции. Широкое применение для производства пенопластов получили карбонат аммония и бикарбонат натрия. Следует отметить, что технический карбонат аммония разлагается очень бурно, что является причиной образования крупнопористой структуры пенопластов. Вспенивающая способность бикарбоната натрия невысока, поэтому для получения пенопластов часто применяют смесь этих двух газообразователей.

В качестве газообразователей, выделяющих газ в результате химического взаимодействия компонентов, наиболее широко применяют тонкодиспергированные металлы, стоящие в ряду напряжения выше водорода (Al, Zn, Mg, Fe). При взаимодействии с минеральными кислотами (H_2SO_4, H_2PO_4, HCl) они выделяют газ (водород). Используя эти реакции, вспенивают фенолоформальдегидные композиции. Для получения пенопластов используют и другие газообразователи. Например, при производстве эпоксидных полимеров применяют полиэтиленполиамин в сочетании с ГКЖ-94.

Газообразователи, выделяющие ранее поглощенные газы вследствие термической десорбции, представляют собой адсорбенты. К их числу относят активированный уголь, силикагель, цеолиты, активированные глины и т. д. Скорость адсорбции и количество поглощенного газа зависят в первую очередь от химической природы адсорбента и структуры его поверхности, а также от давления и температуры, при которых протекает адсорбция. Так как адсорбция газов всегда сопровождается выделением теплоты, то при последующем нагревании газ будет выделяться из адсорбента (десорбция). Поэ-

тому при прочих равных условиях выгодно насыщать адсорбент при возможно более низкой температуре. Чем ниже температура адсорбции, тем больше газа поглотит адсорбент и тем больше он его выделит при нагревании, т. е. тем выше вспенивающая способность адсорбента.

Все рассмотренные выше газообразователи по своему фазовому состоянию относят к твердым вспенивающим веществам.

Жидкие вспенивающие вещества представляют собой легкокипящие жидкости, не растворяющие вспениваемые полимеры: бензол, изопентан, ксилол, толуол, четыреххлоридный углерод, спирты, фреоны различных марок. При нагревании до температуры кипения или при снижении давления окружающей среды эти вещества, переходя в газообразное состояние, вспенивают полимерные композиции. Температуры кипения этих жидкостей находятся в пределах 10...140°С.

Жидкие газообразователи менее перспективны для получения пенопластов, чем твердые вещества, так как при их использовании снижается теплостойкость полимерных композиций вследствие их пластифицирующего воздействия. Наиболее широкое применение получили изопентан (температура кипения 27,85°С) при производстве полистирольных пенопластов и фреоны (температура кипения от 9,25 до 47,6°С) при получении пенополиуретанов и пенополиэпоксидов.

В качестве газообразных вспенивающих веществ в производстве пенопластов чаще всего применяют азот, воздух, инертные газы и реже диоксид углерода. Применение кислорода нецелесообразно, так как при этом может происходить окислительная деструкция полимеров.

Механизм вспенивания полимера заключается в следующем. Полимер насыщают газом под давлением. Последующее снижение давления и повышение температуры приводит к вспениванию полимера. Образующаяся при этом ячеистая или пористая структура фиксируется отверждением при соответствующей температуре в случае применения термореактивных полимеров или снижением температуры в случае использования термопластов.

На процесс вспенивания полимерных композиций и устойчивость образовавшейся ячеистой структуры оказывают влияние следующие факторы: растворимость газа в размягченном полимере при соответствующих температуре и давлении; уменьшение растворимости газа в полимере при повышении температуры и снижении внешнего давления; разность между давлением газа, заполняющего ячейки материала, и давлением окружающей среды; диффузия газа через тонкие стенки ячеек и десорбция его с поверхности материала при вспенивании и в условиях эксплуатации; физико-химические и механические свойства вспененного полимера при температуре вспенивания и эксплуатации.

Чем больше растворимость (сорбция) газа и чем меньше его диффузия через пленки полимера при вспенивании, тем легче получить равномерную мелкопористую структуру с преимущественно замкнутыми порами. Диффузия газа через стенки пор может приводить к усадке материала до его отверждения.

Полимеры с неплотной упаковкой молекул вследствие их разветвленности характеризуются повышенной проницаемостью, диффузией и сорбцией. Наличие в молекуле полимера полярных групп резко снижает газопроницаемость пленок. Природа газа, температура и давление оказывают существенное влияние на растворимость газа в полимере и, следовательно, на процесс вспенивания.

Пенообразующие вещества представляют собой поверхностно-активные вещества, облегчающие диспергирование газа в жидкости (растворе, суспензии) за счет снижения ее поверхностного натяжения, а также повышающие стойкость технических пен за счет образоваиия в адсорбционных слоях высоковязких пространственных структур, значительно замедляющих утончение и разрыв пленок пены.

В качестве пенообразователей в производстве пенопластов можно применять как низкомолекулярные (мыла, соли сульфокислот и др.), так высокомолекулярные (белки, пектины, сапонины и др.) вещества. При растворении этих веществ происходит гидратация их полярных групп, которые прочно связываются с молекулами жидкости электростатическими силами притяжения. Концентрируясь в поверхностном слое на границе раздела фаз, эти силы понижают поверхностное натяжение жидкости и способствуют воздухововлечению и диспергированию воздуха (газа) в жидкости, т. е. увеличению поверхности раздела фаз.

Каждый пенообразователь характеризуется строго определенной оптимальной температурой пенообразования, которая, в свою очередь, находится в непосредственной связи с его молекулярной массой. Вещества с большей молекулярной массой могут образовывать пену при более высокой температуре, чем их низкомолекулярные гомологи.

Весьма существенное влияние на пенообразование и свойства пен оказывает концентрация пенообразователя в жидкости, которая также для каждого его вида имеет свой оптимум. Этот оптимум для низкомолекулярных пенообразователей соответствует неполному, а для высокомолекулярных — полному насыщению адсорбционного слоя. Это происходит потому, что низкомолекулярные пенообразователи при неполном насыщении адсорбционного слоя не вполне ориентированы и их углеводородные цепи, переплетаясь, упрочняют оболочки воздушных ячеек.

Высокомолекулярные пенообразователи располагаются на поверхности раздела фаз длинными цепеобразными молекулами, полярные группы которых направлены в сторону жидкой фазы. Ввиду того что макромолекулы полимера образуют сплошную защитную студнеобразную пленку, увеличение концентрации таких пенообразователей даже выше значений, соответствующих полному насыще-

нию адсорбционных слоев, не приводит к уменьшению стойкости пены.

В настоящее время для получения пенопластов используют синтетические поверхностно-активные вещества — продукты нефтепереработки и нефтехимического синтеза. Как правило, это вещества анионоактивного класса, применяемые в производстве моющих средств. Они образуют стойкие пены и характеризуются весьма высокой кратностью. К ним относят: сульфанолы — смесь натриевых солей алкилбензосульфокислот; вещество «Прогресс» — смесь натриевых солей серпокислых эфиров вторичных спиртов; вещество «Эффект» — триэтаноламиновая соль лаурилсульфата; пенообразователь ПО-1 и другие модификации — нейтрализованный керосиновый контакт на основе сульфокислот.

П о л у ч е н и е г а з о н а п о л н е н н ы х п л а с т м а с с с п р и м е н е н и е м п о в ы ш е н н о г о д а в л е н и я. Способ производства пенопластов с применением высокого давления включает четыре разновидности: прессовый, экструзионный, автоклавный методы и литье под давлением. Все эти разновидности применяют при производстве пенопластов из термопластичных смол. Они основаны на том, что при нагревании выше температуры стеклования эти полимеры приобретают эластомерные (резиноподобные) свойства и способность к обратимой упругоэластичной деформации. Термопластичные полимеры вспенивают в состоянии высокоэластической деформации при температуре, на 10...20°С превышающей температуру стеклования. При этом получают наиболее прочные пенопласты за счет некоторой ориентации молекул. Однако теплостойкость этих пенопластов невысока, так как уже при температуре 70...80°С по мере диффузии газов из ячеек пенопласта наблюдается усадка пенопласта.

Прессовый способ является наиболее распространенным. Он заключается в выполнении трех основных операций: смешивания полимера с газообразователем и другими компонентами, входящими в композицию; прессования композиции; вспенивания заготовок. Принципиальная технологическая схема получения пенопластов прессовым способом приведена на рис. 13.2.

Для получения пенопластов из твердых композиций смешивание компонентов производят в шаровых мельницах, снабженных рубашками охлаждения. Процесс совместного помола продолжается 6...24 ч до получения однородной тонкодисперсной смеси. В шаровых мельницах вместимостью более 1 м^3 лучше применять фарфоровые или диабазовые шары вследствие значительного выделения теплоты от трения металлических шаров.

При приготовлении композиций в виде паст исходные вещества смешивают в смесителях лопастного типа. Полученную пасту подвергают созреванию (желированию) путем выдерживания ее в емкостях при температуре 25...30°С не менее 2 сут. Прессуют композиции на гидравлических прессах в пресс-формах закрытого типа.

В процессе прессования под влиянием повышенной температуры (120...180°С) и давления (12...20 МПа) частицы полимера сплавляются в монолитную массу. Несколько позже разлагается газообразователь, и выделившиеся газы частично растворяются в полимере, образуя насыщенный раствор. Частично (избыток газа) равномерно распределяется в полимере в виде мельчайших элементарных

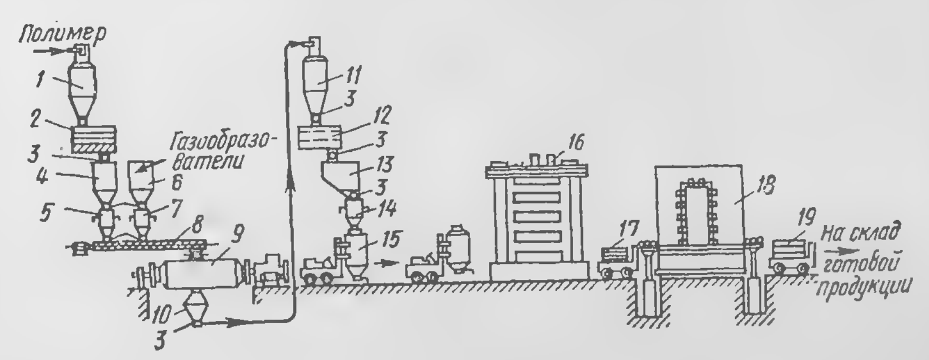


Рис. 13.2. Технологическая схема производства пенопластов прессовым методом:

1 — бункер-циклон для полимера; *2* — сито-бурат; *3* — шлюзовой затвор; *4* — бункер для просеянного полимера; *5* — автоматическое дозирующее устройство для полимера; *6* — бункер для газообразователей; *7* — то же, для газообразователя; *8* — шнек; *9* — шаровая мельница с приводом; *10* — бункер для композиции; *11* — бункер-циклон для композиции; *12* — вибросито; *13* — бункер; *14* — автоматический дозатор для композиции; *15* — автопогрузчик с подвижным бункером; *16* — пресс; *17* — автокар для перевозки заготовок; *18* — камера вспенивания; *19* — автокар с готовыми плитами

пузырьков. С целью полного прогрева заготовки ее выдерживают при температуре прессования. Продолжительность выдерживания зависит от толщины заготовки и составляет 1...2 мин на 1 мм толщины.

Горячее прессование оказывает решающее влияние на равномерное распределение газа в заготовке и на размер элементарных ячеек. Быстрый подъем температуры, неравномерный обогрев пресс-формы, недостаточное давление пресса — все это существенно ухудшает качество пенопласта и может привести к браку.

Большую роль при получении пенопластов с малой средней плотностью играет такой технологический прием, как подвспенивание заготовок в пресс-форме в конце выдержки после достижения выравнивания температуры во всем объеме заготовки. В этом случае за счет более полного использования растворенного в полимере газа получают пенопласты с существенно пониженной средней плотностью без увеличения расхода газообразователя. Подвспенивание производят путем плавного снижения давления пресса, в результате чего давление газов в пресс-форме поднимает пуансон, увеличивая высоту заготовки. При этом средняя плотность заготовки снижается на 30...50%. После выдержки под прессом заготовки охлаждают до комнатной температуры и извлекают из пресс-формы.

Окончательное вспенивание заготовок производят в специальных камерах при нагревании заготовок до размягчения полимера (до температуры 85...120°С). В зависимости от вида полимера нагревание производят паром, водой или горячим воздухом. При этом под возрастающим давлением газа, находящегося в ячейках, образовавшихся в результате предварительного подвспенивания, и вследствие снижения растворимости газа в полимере происходят увеличение

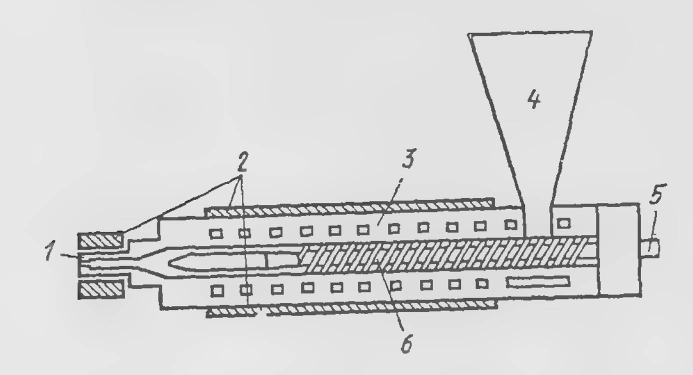


Рис. 13.3. Схема экструдера:

1 — экструзионная головка; *2* — нагреватели; *3* — каналы для водяного охлаждения; *4* — загрузочный бункер; *5* — вал; *6* — шнек

размеров первичных ячеек и образование новых. Заготовка, находящаяся в свободном состоянии, вспенивается. Для придания заготовке четкой требуемой формы вспенивание рекомендуется производить, заключая заготовки в перфорированные металлические ограничительные кассеты.

Закрепление полученной пористой структуры и приданной изделию формы производят охлаждением изделий в тех же кассетах до комнатной температуры.

По прессовому способу можно вспенивать любой термопластичный полимер. Однако громоздкость технологического оборудования, отсутствие поточности, многодельность и большая продолжительность подготовки формовочных смесей существенно повышают стоимость получаемых материалов и сдерживают широкое развитие этого способа.

Экструзионный метод весьма технологичен и производителен.

При этом методе экструдер является основным технологическим оборудованием (рис. 13.3), в котором осуществляются уплотнение полимерной композиции, заранее подготовленной одним из способов, рассмотренных выше, ее нагрев до заданной температуры в зависимости от вида используемого полимера, расплавление полимера, разложение газообразователя, распределение выделившегося газа в расплаве полимера, формование изделия в головке экструдера. Сразу же по выходе из головки экструдера композиция вспенивается и полученная заготовка поступает в приемное оборудование, где она охлаждается и по мере необходимости оправляется. Экструзионным методом пенопласты можно получать двумя путями: прямой экструзией и экструзией с последующим вспениванием или довспениванием. В первом случае из головки экструдера выходит лист, полоса, цилиндр, скорлупа или какое-либо другое изделие с требуемой средней плотностью. Во втором случае требуется вспенивание (довспенивание) выходящего изделия до требуемой средней плот-

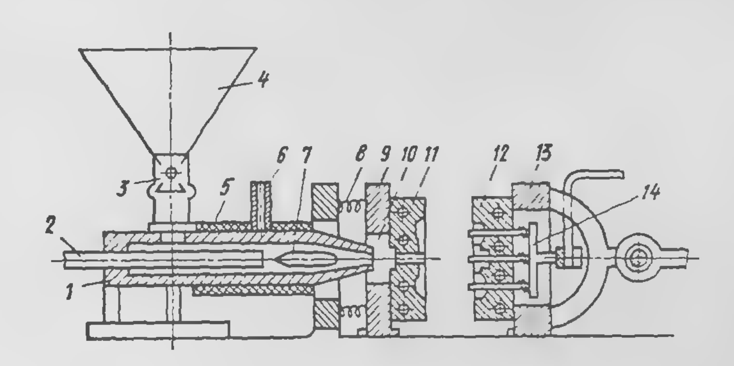


Рис. 13.4. Схема литьевой машины

ности путем нагрева изделия паром, горячей водой или горячим воздухом в зависимости от вида используемого полимера.

Разработаны также конструкции экструдеров, в которых процесс производства пенопластов осуществляется без газообразователей. В этом случае газ под давлением подается непосредственно в винтовой канал и распределяется в расплавленном полимере.

Экструзионный метод значительно эффективнее прессового. При его применении обеспечиваются непрерывность процесса, высокая производительность, возможность регулирования в широких пределах средней плотности изготовляемых пенопластов, изготовление изделий широкой номенклатуры по форме и размерам и использование полной автоматизации технологического процесса

Автоклавный метод получения пенопластов основан на насыщении полимера газами или низкокипящими жидкостями под давлением или под давлением при пониженных температурах (применяют сжатые газы или низкокипящие жидкости, охлажденные сухим льдом). Вспенивание композиции производят в том же автоклаве или в другом оборудовании путем нагревания до размягчения полимера и снятия давления.

Автоклавный способ распространен в США, в Советском Союзе в промышленном масштабе он не применяется.

Литье под давлением применяют для изготовления штучных изделий из пенопластов. Схема литьевой машины приведена на рис. 13.4. Принцип ее работы состоит в следующем. Полимерную композицию в виде порошка или гранул засыпают в бункер *4*. Через

дозирующее устройство *3* порция композиции попадает в левую холодную часть цилиндра *1* (в это время плунжер *2* находится в крайнем левом положении). Когда материал засыпан, плунжер начинает двигаться и проталкивает порцию композиции в правую часть цилиндра *1*, нагреваемую электроустройством *5*. Температура нагрева контролируется термометром. *6*. При возвратно-поступательном движении плунжера в нагреваемую часть цилиндра поступает новая порция массы, а уже разогретый материал, перешедший в пластичное состояние, проталкивается сердечником *7* в сопло *10*. В этот момент специальный механизм сдвигает подвижные плиты *9* и *13*, которые сжимают обе половины пресс-формы (пуансон *12* и матрицу *11*), а затем и пружины *8*. Сомкнутая пресс-форма прижимается к соплу *10* цилиндра литьевой машины. После этого следует очередной рабочий ход плунжера, под давлением которого пластическая масса с растворенными в ней газами, выделившимися при разложении газообразователя в конце правой нагреваемой части цилиндра *1*, переходя по летниковым каналам, поступает в оформляющую полость охлаждаемой пресс-формы, где вспенивается и охлаждается.

По окончании выдержки, необходимой для охлаждения и отверждения вспененных изделий, пресс-форма расчленяется и из матрицы толкателем *14* готовое изделие выталкивается в приемник. Литьевая машина работает в автоматическом режиме. Получаемые изделия отличаются четкостью формы, которую можно изменять путем замены оформляющей части пресс-формы.

Получение изделий из пенопластов без применения повышенного давления. Для получения пено- и поропластов без применения повышенного давления существует несколько методов: беспрессовый, химический, дисперсионный.

Беспрессовый метод имеет ряд разновидностей. Широкое распространение получило производство пенопластов из предварительно вспененных гранул последующим их спеканием в формах или на конвейерных установках. Таким образом получают беспрессовый полистирольный пенопласт.

Гранулы полистирола, полученные суспензионной полимеризацией стирола в присутствии вспенивающего агента (изопентана), подвергают предварительному вспениванию при нагревании, а затем формуют изделия в среде теплоносителя (водяной пар, горячая вода) или нагревают токами высокой частоты и др. На стадии предварительного вспенивания нагретые гранулы размягчаются и под действием вспенивающего агента, переходящего из жидкого состояния в газообразное, увеличиваются в объеме. Предварительное вспенивание гранул осуществляют в свободном объеме в аппаратах периодического (емкости, ванны) или непрерывного действия (шнековые барабанные и другие предвспениватели). Процесс осуществляют при температуре 90...120°С, используя различные виды теплоносителя: водяной пар, горячую воду. Гранулы полистирола при этом резко снижают среднюю плотность, которая достигает значений, близким к заданным для готовой продукции. Предварительно вспененные гранулы выдерживают при нормальной температуре для ликвидации образовавшегося в них разрежения при охлаждении.

Изделия из предвспененных гранул формуют на оборудовании периодического действия (стационарные формы, автоклав) или непрерывного действия (карусельные машины, пакетные формователи, конвейерные линии) с использованием различных теплоносителей. Температура формования находится в пределах 95...105°С. Гранулы размягчаются, увеличиваются в размерах и спекаются друг с другом, образуя изделие.

Разновидностью беспрессового метода является вспенивание композиции, состоящей из полимера, мономера, газообразователя и инициатора. Компоненты смешивают на вальцах или в смесителе, из массы формуют блок, который затем вспенивают путем его нагревания до температуры разложения газообразователя. Этот способ называют «полимер-мономерных паст», его применяют в основном для получения полистирольных и поливинилхлоридных пенопластов. Этим способом можно получать вспененные материалы и из термореактивных полимеров или их смесей с термопластичными. Например, порошкообразный поливинилхлорид смешивают на горячих вальцах с фенилизоцианатом и эту композицию вспенивают в пластическом состоянии при обработке паром. В данном случае вспенивающим агентом является CO_2, выделяющийся при взаимодействии фенилизоцианата с водой. Отверждение происходит за счет образования трехмерной структуры при избытке изоцианата.

Третьей разновидностью беспрессового метода является вспенивание композиций, состоящих из полимера, газообразователя и отвердителя, путем ее нагрева до температуры разложения газообразователя с последующим отверждением за счет образования трехмерной структуры. Этот способ применяют для получения пенопластов на основе новолачных и фенолоформальдегидных полимеров.

Химический метод заключается в том, что реакционная смесь, состоящая из мономеров или продуктов неполной полимеризации (поликонденсации), вспенивается газами, выделяющимися при полимеризации (поликонденсации), или при взаимодействии компонентов с последующим отверждением полученных полимеров. Для улучшения диспергирования газа в смесь обычно вводят слабые пенообразователи (эмульгаторы), изменяющие поверхностное натяжение жидкости на границах двусторонних пленок (например, эмульгаторы марок ОП-7, ОП-10, ВНИИЖ и др.). Для снижения средней плотности получаемых материалов при недостаточном количестве газа, выделяющегося при реакциях полимеризации или поликонденсации, в смесь вводят жидкие или твердые газообразователи, которые испаряются или разлагаются при повышении температуры смеси за счет теплоты реакций полимеризации или поликонденсации.

Дисперсионный метод в принципе представляет собой метод пенообразования, который применяют при производстве пенобетонов. Процесс изготовления пенопластов осуществляют следующим образом. Водный раствор термореактивных полимеров (мочевиноформальдегидных, фенолоформальдегидных и др.) с введенными в него пенообразователем и катализатором вспенивают путем интенсивного перемешивания в быстроходных смесителях или продуванием через раствор какого-либо малорастворимого в воде газообразного вещества. Полученную пеномассу отверждают в стационарных формах. Качество таких пенопластов во многом зависит от поверхностной активности пенообразователя, вязкости и прочности поверхностных слоев вспененных растворов. Особо важную роль играет стойкость пены, так как для перехода стенок пеновых пузырьков из жидкой фазы в твердую (для отверждения полимера) требуется определенное, иногда весьма длительное (40...60 ч) время, а часто и повышенная температура.

Влияние условий получения пенопластов на их свойства. Полимерные теплоизоляционные материалы можно отнести к категории гетерогенных систем, состоящих из газообразной фазы, диспергированной в твердой среде. Форма отдельных ячеек определяется условиями вспенивания. Вначале образуются наполненные газом ячейки, имеющие шаровидную форму, затем по мере дальнейшего расширения газа ячейки увеличиваются в размерах, приходят в соприкосновение друг с другом и деформируются, принимая форму многогранников, вытянутых в направлении вспенивания. Дальнейший рост размеров ячеек и утончения межпоровых перегородок приводит к разрушению ячеистой структуры и образованию сообщающихся пор (пористой структуры).

Устойчивость вспененных полимеров зависит от агрегативной устойчивости, определяющей возможность коалесценции газовых пузырьков и формоустойчивости, характеризующей возможность деформации отвержденного вспененного полимера без изменения степени дисперсности его пористости.

Агрегативная устойчивость зависит от соотношения между газовым давлением внутри ячеек и прочностью на растяжение пленок, образующих стенки пор. Она тем больше, чем меньше размер ячеек, больше толщина и прочность межпоровой перегородки.

При вспенивании полимера агрегативная устойчивость пены до отверждения полимера определяет характер пористой структуры получаемого материала. При повышении давления в ячейках сверх допустимого или при значительной полидисперсности ячеек образуется пористая структура с сообщающимися порами или же материал разрушается.

Все факторы, повышающие прочность полимера (ориентация молекул, образование поперечных связей, увеличение глубины и степени полимеризации), повышают агрегативную устойчивость вспененного полимера. Деформация вспененных полимеров без изменения степени дисперсности ячеек может быть вызвана изменением газового давления в ячейках. Поэтому формоустойчивость зависит от соотношения между давлением газа внутри ячеек и давлением окружающей среды, а также от химического строения, физического состояния и механических показателей полимера, с одной стороны, и физико-химических свойств газа, заполняющего ячейки, с другой стороны.

Пенопласты на основе термопластичных полимеров при нормальной температуре характеризуются высокой агрегативной устойчивостью, а повышение температуры выше температуры стеклования приводит к деформации ячеек вследствие сжатия их оболочек (релаксация).

У пенопластов на основе термореактивных полимеров верхний предел температурного интервала агрегативной устойчивости выше и приближается к температуре термической деструкции полимера. Формоустойчивость их также велика.

Формоустойчивость вспененных полимеров зависит также от вида применяемого газообразователя, наличия пластификаторов в композиции и газопроницаемости полимера.

Пенопласты, в состав которых входят пластификаторы или газообразователи, при разложении которых образуются вещества, способные пластифицировать полимер, всегда менее жесткие и менее теплостойкие. При высоких степенях вспенивания и повышенных температурах влияние газопроницаемости на формоустойчивость усиливается, так как за счет уменьшения толщины стенок ячеек ускоряется диффузия. Поэтому при вспенивании для получения формоустойчивых пенопластов необходимо применять газообразователи, выделяющие газы, характеризующиеся меньшим коэффициентом диффузии и проницаемости.

13.3. Пенопласты на основе полистирола

Полистирольные пенопласты нашли наиболее широкое применение в строительстве среди всех видов пенопластов. Производство плит из пенополистирола было начато в нашей стране в 60-х годах. В 1985 г. выпуск этого материала значительно возрос.

Для строительных целей полистирольные пенопласты получают беспрессовыми методами, выпуская изделия марок ПСБ и ПСБС (пенополистирол беспрессовый и пенополистирол беспрессовый самозатухающий).

Средняя плотность пенополистирольных изделий колеблется в пределах 16...40 кг/м³ и отражается в марках цифровыми значениями, например ПСБ-20, ПСБС-30 и т. п.

Плиты марки ПСБС не должны поддерживать самостоятельного горения после удаления источника огня в течение более 5 с.

Температура применения плит ПСБ и ПСБС определяется изменением свойств пенопласта и не должна превышать 60°С, так как при повышении температуры даже до этого предела их механиче-

ские характеристики снижаются на 30...40°, а при температурах 80°С и выше возникают усадочные деформации (табл. 13.2).

Таблица 13.2. Основные свойства полистирольных пенопластов марок ПСБ и ПСБС

Показатель	Нормы для марок со средней плотностью в сухом состоянии, кг/м³			
	20	25	30	40
Прочность при статическом изгибе, МПа, не менее	0,07	0,1	0,13	0,18
Прочность при 10%-ном сжатии, МПа, не менее	0,05	0,07	0,1	0,15
Теплопроводность в сухом состоянии при 25±5°С, Вт/(м·°С) не более	0,035	0,038	0,038	0,038
Водопоглощение за 24 ч, % по объему, не более	5	4	3	2

Полистирольные пенопласты применяют в виде термовкладышей в стеновых панелях, кровельных покрытиях. Их можно использовать для заполнения пустот в железобетонных и других видах конструкций.

Теплоизоляционные плиты изготовляют из бисерного полистирола, содержащего в качестве газообразователя изопентан и выпускающегося химической промышленностью в виде гранул диаметром 0,5...3,0 мм. Производят теплоизоляционные плиты путем двуступенчатой тепловой обработки. Наибольшее распространение в отечественной практике получили способы, при которых формирование изделий из предвспененных гранул осуществляется в стационарных обогреваемых формах, в переносных формах, с проведением тепловой обработки в автоклавах, на конвейерных линиях.

Наиболее перспективным является непрерывный способ формования изделий, осуществляемый на конвейерных линиях (рис. 13.5). В этом случае переработка бисерного полистирола в изделия осуществляется по принципу движения непрерывной конвейерной ленты — поддона, проходящей через различные температурные зоны, в которых происходят процессы предвспенивания бисерного полистирола, выдерживания предвспененных гранул и формования изделий за счет спекания отдельных зерен в монолит. Готовый материал выходит в виде непрерывной ленты, которая затем разрезается на плиты заданных размеров.

В СССР впервые такая линия была разработана проектно-конструкторским бюро Министерства промышленности строительных материалов БССР. Технологический процесс на этой линии осуществляется следующим образом. Предварительное вспенивание осуществляется в непрерывно действующих шнек-машинах в течение 0,5...1 мин при давлении пара 0,03...0,05 МПа. Предвспененные гранулы выдерживаются в бункерах хранения при температуре 20...28°С в течение не менее 4 ч и не более 7 сут. Затем гранулы пневмотранспортом подаются в расходный бункер *1* (см. рис. 13.5), оборудованный вертикальными смесителями, для предовращения сводообразования. Из расходного бункера гранулы засыпаются на нижний лотковый конвейер *9*, палеты которого имеют перфорацию для прохождения пара к спекаемому материалу. Высоту засыпки гранул регулируют с помощью шибера *2*. Пар к материалу поступает из паровых камер *4*, которые установлены в средней и правой частях лоткового конвейера.

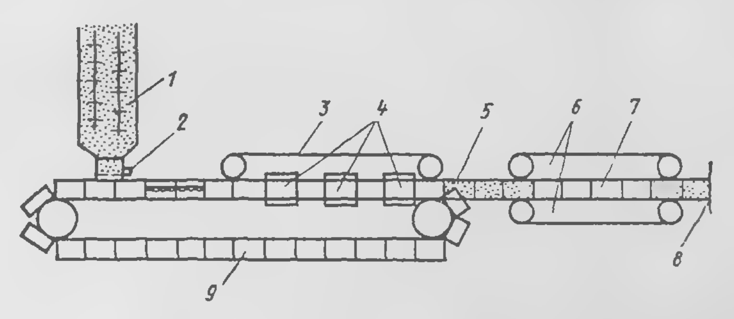


Рис. 13.5. Принципиальная схема установки для непрерывного формования пенополистирола беспрессовым методом

Верхний пластинчатый конвейер *3* предназначен для создания замкнутого геометрического пространства, в котором происходят довспенивание и спекание гранул в монолит. Для создания избыточного давления в зоне спекания устраивают специальные уплотнения в кожухе, который изолирует конвейеры и паровые камеры.

В зоне спекания гранулы образуют сплошной брус *5* сечением 1000×1000 мм, который, выходя из камеры спекания, захватывается резиновыми лентами конвейеров *6* и протягивается через калибрующее устройство *7*. Далее брус с помощью автоматического устройства *8* разрезается на плиты заданных размеров.

Производительность такой установки составляет 30...40 тыс. м³ изделий в год. Ее обслуживают трое рабочих в смену.

Самозатухающий пенополистирол ПСБС получают теми же технологическими способами без изменения технологических параметров. В этом случае либо используют бисерный полистирол, в состав которого на стадии изготовления введены антипирены, либо обрабатывают обычные гранулы после их предвспенивания водной суспензией антипирена, состоящего из триоксида сурьмы, хлорированных парафинов ХП-70 и эмульгатора ОП-7. Дальнейшая технология пенопласта остается без изменений.

Омоноличивание (спекание) предвспененных зерен полистирола можно осуществлять непосредственно в строительных конструкциях во время их совместной тепловлажностной обработки в пропарочных камерах, автоклавах, кассетах и т. п. (табл. 13.3).

Таблица 13.3. Технологические параметры формования изделий из пенополистирола

Метод вторичного вспенивания	Параметры формования		
	температура, °С	давление пара, МПа	время выдерживания, мин
В водяной ванне	95 ... 98	—	10 ... 30
В автоклаве	102 ... 115	0,12 ... 0,13	30 ... 60
Острым паром в формах:			
передвижных	100 ... 120	0,1 ... 0,2	0,5 ... 3
стационарных	100 ... 120	До 0,4	1 ... 5
На конвейере	100 ... 115	0,1 ... 1,5	12 ... 15
В карусельной машине	110 ... 120	0,17	4
Токами высокой частоты	100 ... 105	—	0,5 ... 3

Весьма перспективным направлением использования полистирола в строительной тепловой изоляции является получение композиционных материалов, изделий и конструкций из них. Сочетание пенополистирола с минеральными вяжущими веществами (цементом, гипсом, ГЦПВ) хотя и приводит к заметному увеличению средней плотности изделий (до 200 кг/м³ и выше), но позволяет получать трудносгораемый материал с весьма высокими механическими и теплоизоляционными свойствами.

Особенно перспективен так называемый «метод самоуплотняющихся масс», разработанный в МИСИ им. В. В. Куйбышева.

Сущность этого метода заключается в следующем. Формовочную смесь, состоящую из раствора вяжущего и подвспененных зерен полистирола, помещают в замкнутый перфорированный объем (в перфорированную форму нужной конфигурации) и подвергают тепловой обработке. Зерна полистирола, довспениваясь и увеличиваясь в размере, создают внутреннее давление в массе. В результате из массы через перфорацию формы выжимается вода (до 70% от начального водосодержания) и одновременно равномерно по всему объему происходит уплотнение обезвоживающегося раствора вяжущего. Тепловую обработку таких масс можно осуществлять в пропарочных камерах, автоклавах, сушилках, обогреваемых пресс-формах. Однако лучшие результаты получаются при применении электропрогрева. В этом случае массу укладывают в токонепроводящие формы и с помощью электродов пропускают через нее ток промышленной частоты. За счет сопротивления массы температура за 1...3 мин возрастает до 80...100°С, причем более высокая температура в начале процесса набюдается в средней части массы. Поэтому наиболее интенсивное вспучивание зерен полистирола начинается именно там, вследствие чего вода из центра изделия отжимается к периферии и через перфорацию формы удаляется наружу.

Этим методом можно получать многослойные изделия и конструкции, обладающие высоким термическим сопротивлением и необходимыми прочностными показателями. При этом за счет миграции наиболее тонких частиц вяжущего и развиваемого зернами

давления обеспечивается хорошее сцепление между разноплотными слоями с наличием переходных зон. Механическое удаление большей части воды затворения делает этот способ малоэнергоемким, а хорошее равномерное уплотнение минеральной части материала существенно (в 1,5 ... 2 раза) увеличивает его прочность по сравнению с полистиролбетоном той же средней плотности, полученным обычным способом.

При применении способа самоуплотняющихся масс для производства высокопористой керамики и огнеупоров в 3...4 раза снижается расход топлива на сушку сырца и практически полностью исключаются сушильные усадки. В этом случае применяют отсев бисерного полистирола (фракции менее 0,5 мм). Выгорая при обжиге, зерна полистирола формируют равномерную пористую структуру с замкнутыми порами.

Применяя вяжущие вещества, развивающие при твердении высокую до 85...90°С температуру, можно вообще обходиться без тепловой обработки, а использовать для вспучивания гранул полистирола экзотермический эффект твердения.

13.4. Пенопласты на основе поливинилхлорида

Поливинилхлорид представляет собой термопластичный полимер, который содержит до 56% связанного хлора, что обеспечивает его пониженную горючесть по сравнению с полистиролом. Это свойство сохраняется и у вспененного поливинилхлорида. Кроме того, в отличие от полистирола поливинилхлорид может пластифицироваться при помощи различных пластификаторов, что позволяет получать на его основе пенопласты различной упругости — от жестких до эластичных. Пенопласты на основе поливинилхлорида и его сополимеров можно получать как прессовым, так и беспрессовым методами.

В СССР на основе поливинилхлорида в промышленном масштабе прессовым методом производят жесткие пенопласты: ПХВ-1, ПХВ-2, ПХА и эластичные — ПХВ-Э, а беспрессовым методом — ПВ-1 (жесткий), винипор жесткий и винипор эластичный.

Поливинилхлорид имеет худшую по сравнению с полистиролом эластическую деформацию при повышенных температурах благодаря полярности молекул, большим силам межмолекулярного сцепления и высокой температуре размягчения, весьма близкой к температуре разложения. Поэтому в состав композиций, особенно при получении жестких пенопластов прессовым методом, необходимо вводить мономеры, повышающие текучесть поливинилхлорида в первой стадии прессования. Обычно для этого используют метилметакрилат. Для получения пенопластов используют в основном поливинилхлорид марок ПВХ-Л5, ПВХ-Л7, ПВХ-Л8 и ПВХ-Л9, отличающиеся друг от друга величиной К (константой, характеризующей среднюю молекулярную массу полимера).

Молекулярная масса поливинилхлорида оказывает существенное влияние на среднюю плотность получаемого пенопласта (из низкомолекулярных полимеров легче получить пенопласт с низкими значениями средней плотности). При снижении молекулярной массы снижаются силы межмолекулярного сцепления, благодаря чему молекулы полимера приобретают большую подвижность и оказывают меньшее сопротивление при вспенивании.

В качестве газообразователей обычно используют порофор ЧХЗ-57, углекислый аммоний и бикарбонат натрия.

Для получения эластичных пенопластов в качестве пластификаторов применяют дибутилфталат и трикрезилфосфат. Но из-за некоторых отрицательных свойств этих веществ (большой летучести, невысокой морозостойкости и токсичности) предпочтительнее применять диоктилфталат, особенно при получении пенопластов, применяющихся в жилищном строительстве.

Трикрезилфосфат — сложный эфир ортофосфорной кислоты и трикрезола; наличие в нем небольших количеств эфира *о*-крезола делает его токсичным.

Дибутилфталат — прозрачная маслянистая жидкость со слабым специфическим запахом, обладает значительной летучестью.

Диоктилфталат — прозрачная жидкость со слабым специфическим запахом, его химическая формула $n\text{—}C_6H_4\text{—}(COOC_8H_{17})_2$.

Получение пенопластов на основе поливинилхлорида прессовым методом. Жесткие пенопласты марок ПВХ-1, ПВХ-2 и ПХА получают по технологическим схемам и на оборудовании, описанном в начале данной главы. Отличительными особенностями этих марок пенопластов являются рецептура (составы) композиций и технологические параметры переработки полимерных композиций в пенопласты. В табл. 13.4 приведена рецептура для пенопластов ПВХ-1 и ПВХ-2; рецептура же ПХА аналогична рецептуре ПВХ-1, только вместо метилметакрилата применяют антраценовое масло (1 масс. ч. на 8 масс. ч. ПВХ).

Таблица 13.4. **Рецептура ПВХ композиций**

Компонент	Содержание, масс. ч.	
	ПВХ-1	ПВХ-2
Поливинилхлорид	100	100
Метилметакрилат	25	25
Порофор ЧХЗ-57	0,3 ... 0,8	1,01
Углекислый аммоний	10 ... 16	10
Бикарбонат натрия	8	8

При получении ПВХ-1 применяют поливинилхлорид с К=45...50, а при получении ПВХ-2 — с К=50...60, т. е. с большей молекулярной массой.

Приготовление композиции осуществляют следующим образом. Вначале в отдельных аппаратах с мешалкой приготавливают раствор порофора ЧХЗ-57 в метилметакрилате, который в пропорции 1 : 3 смешивают с частью поливинилхлорида. Затем все компоненты композиции загружают в шаровую мельницу в следующем порядке: углекислый аммоний, бикарбонат натрия; поливинилхлорид и смесь поливинилхлорида с раствором порофора ЧХЗ-57 в метилметакрилате. Продолжительность обработки смеси в шаровой мельнице составляет 20...24 ч при постоянном охлаждении водой. Полученную композицию просеивают и помещают в закрытые металлические емкости, в которых она хранится при температуре не выше 35°С. Заготовки прессуют при температуре 160...180°С и удельном давлении 15...18 МПа.

В процессе прессования заготовок из композиций на основе поливинилхлорида происходят более сложные физико-химические процессы, чем при прессовании из полистирола. Кроме сплавления полимера в однородную массу и разложения газообразователя происходит полимеризация метилметакрилата и частичное отщепление СН от поливинилхлорида с образованием двойных связей или пространственного полимера. Поэтому правильное соблюдение рецептуры и режимов прессования имеет решающее значение для качества получаемого продукта.

Рис. 13.6. Влияние высоты подвспенивания на среднюю плотность пенопласта

При получении пенопласта со средней плотностью менее 70 кг/м³ заготовки необходимо подвспенивать. Подвспенивание проводят перед концом выдержки постепенно в течение 3...4 мин. Величина подвспенивания зависит от требуемой средней плотности пенопласта (рис. 13.6).

Окончательное вспенивание заготовок осуществляют в паровых камерах, как правило, в ограниченных формах, соответствующих по форме и размерам получаемым изделиям. Температура вспенивания составляет 98...105°С, а продолжительность — 60...120 мин в зависимости от размеров заготовок.

Получение *эластичных* пенопластов марки ПВХ-Э осуществляют, применяя поливинилхлорид с более высокой молекулярной массой (К=60...65). Рецептура композиции, масс. ч., такова: поливинилхлорид — 100, порофор ЧХЗ-57 — 10...15, дибутилфталат — 25...50, трикрезилфосфат — 25...50.

Компоненты смешивают в лопастном смесителе при нормальной температуре в течение 6...8 ч. Полученную пасту перед прессованием выдерживают в емкостях при температуре 25...30°С в течение 2...3 сут.

Прессование заготовок производят по следующему режиму: давление — 18 МПа, температура прессования — 160...170°С, время подъема температуры — 10...20 и выдержки — 25...35 мин.

Отпрессованную заготовку вспенивают в горячей воде при 80...85°С в течение 60...120 мин.

Получение пенопластов на основе поливинилхлорида беспрессовым методом. Беспрессовым методом на основе поливинилхлорида получают в промышленных масштабах пенопласт ПВ-1 путем вспенивания композиции газами, выделяющимися при разложении газообразователей, и винипор жесткий и эластичный путем насыщения поливинилхлоридной пасты газом под давлением с последующей желатинизацией.

Пенопласт ПВ-1 изготовляют на основе поливинилхлорида и перхлорвинила с добавлением метилметакрилата. В качестве газообразователя используют порофор ЧХЗ-57.

Процесс изготовления пенопласта состоит из следующих операций: перемешивания всех твердых компонентов (полимеров и газообразователя) в шаровых мельницах; получения из смеси при добавлении к ней метилметакрилата листов путем вальцевания; нагревания листов до температуры 100...110°С в ограничительных формах в среде глицерина или в камерах с электрообогревом; вспенивания заготовки в ограничительной перфорированной форме (кассете), размеры которой соответствуют размерам выпускаемых изделий. Вспенивание осуществляют при нагревании заготовки до 130...135°С в течение 90 мин. В процессе нагревания полимерная основа композиции размягчается и вспенивается в результате разложения газообразователя. После охлаждения кассеты до температуры 25...30°С ее разнимают и извлекают готовое изделие.

Винипор изготовляют из поливинилхлорида и пластификаторов, которые берут в соотношении 1 : 1. В качестве пластификаторов применяют метилметакрилат и дибутилфталат. В зависимости от соотношения этих пластификаторов изменяется жесткость получаемого материала. Жесткий винипор получают, вводя в композицию большее количество метилметакрилата, а эластичный — дибутилфталата. При примерно равном количестве этих веществ получают полужесткий материал. Для ускорения полимеризации метилметакрилата в композицию вводят инициатор — порофор ЧХЗ-57.

Изделия из винипора изготовляют поточным методом. Все компоненты смешивают, получая пасту, которую при пониженной температуре под давлением 2...2,5 МПа в специальном смесителе насыщают диоксидом углерода. Из смесителя паста поступает на конвейер, где в результате снижения давления вспенивается диоксидом углерода. На конвейере вспененная масса прогревается до 160...175°С с помощью токов высокой частоты и конвекционного прогрева. После охлаждения полученный винипор разрезается на блоки нужных размеров.

Винипор характеризуется равномерной открыто-пористой структурой с размерами пор: у жесткого материала — от 100 до 500 мкм, у эластичного — от 200 до 500 мкм.

С в о й с т в а и п р и м е н е н и е п е н о п л а с т о в н а о с н о в е п о л и в и н и л х л о р и д а.

Пенопласты ПВХ-1 выпускаются со средней плотностью 50...130 кг/м³, а ПВХ — 130...220 кг/м³. Они характеризуются прочностью при изгибе соответственно 1,5...2,8 и 3,0...6,5 МПа, а при 10%-ном сжатии — 0,4...0,9 и 0,8...4,5 МПа. Теплопроводность этих материалов в зависимости от средней плотности находится в пределах 0,026...0,0052 Вт/(м·°С), рабочая температура — от —60 до +60°С. Материалы горючи, но при удалении источника пламени они затухают.

Пенопласт ПВХ-Э характеризуется пониженной прочностью (0,03...0,05 МПа при 10%-ном сжатии и 0,15...0,6 МПа при растяжении), его теплопроводность в зависимости от средней плотности колеблется в пределах 0,043...0,066 Вт/(м·°С), а рабочая температура — от —10 (—30) до +40°С. При температуре 60°С этот пенопласт характеризуется повышенной линейной усадкой (до 5%).

Жесткие пенопласты ПВХ-1 и ПВХ-2 хорошо обрабатываются на деревообрабатывающих станках и ручным столярным инструментом. Их применяют в качестве теплоизоляционных вкладышей в стеновых панелях, плитах покрытий, дверях перегородок. Эластичный материал ПВХ-Э используют в качестве герметика и для устройства звукоизолирующих прокладок под полы.

Пенопласт ПВ-1 представляет собой материал с равномерной замкнуто-ячеистой структурой, его средняя плотность колеблется в пределах 50...120 кг/м³. По остальным свойствам он аналогичен пенопласту ПВХ-1. Общим существенным недостатком всех этих пенопластов является низкий потолок термической устойчивости (40...60°С).

Винипор, характеризующийся сообщающейся пористостью (до 90%), наиболее широко применяют для устройства звукопоглощающих и звукоизолирующих конструкций (звукопоглощающих облицовок, прокладок под полы, модификации линолеума и т. д.).

13.5. Пенопласты на основе фенолоформальдегидных композиций

Этот вид пенопластов по применению в строительстве занимает второе место после пенополистирольных изделий. Общий объем выпуска пенопластов на основе фенолоформальдегидных композиций в 1985 г. составил около 760 тыс. м³. Этому способствуют широко развитая производственная база для получения исходных компонентов, несложность технологии, значительные запасы сырья.

Пенопласты на основе фенолоформальдегидных композиций отличаются повышенными тепло- и огнестойкостью. Они могут быть получены на основе термопластичных (новолачных), термореактивных (резольных) фенолоформальдегидных полимеров.

В СССР промышленное применение для изготовления пенопластов на основе фенолоформальдегидных полимеров получили в основном два метода: беспрессовый и заливочный.

Беспрессовым методом получают пенопласты из новолачных полимеров, молекулы которых имеют линейное или разветвленное строение. Отверждаться они могут лишь в присутствии уротропина, с которым взаимодействуют, образуя полимер пространственной структуры. В состав композиции кроме полимера и уротропина входят порофор ЧХЗ-57, сера, каучук, алюминиевая пудра и иногда стекловолокно.

Для получения пенопластов применяют новолачный фенолоформальдегидный полимер № 18, получаемый конденсацией фенола и формальдегида в присутствии соляно- или щавелевокислого катализатора. Он представляет собой твердый хрупкий продукт, хорошо растворяющийся в спирте и ацетоне. Отвердитель — уротропин $(CH_2)_6N_4$.

На основе композиций, приведенных в табл.13.5, получают пенопласты различных марок. Наиболее широкое промышленное производство фенолоформальдегидных пенопластов этим способом получил пенопласт марки ФС-7.

Таблица 13.5. Составы промышленных марок пенопластов на основе новолачных фенолоформальдегидных полимеров

Марка пенопласта	Содержание компонентов, мас. ч					
	полимер № 18	уротропин	каучук СКН-40	сера	стекловолокно	порофор ЧХЗ-57
ФФ	100	10	—	—	—	1 ... 2
ФК-20	100	10	20	0,6	—	2 ... 5
ФК-40	100	10	40	1,2	—	3 ... 7
ФС-7	100	15	—	—	7 ... 10	5

Примечание. При введении в композицию ФК алюминиевой пудры (1,2 ... 1,8 мас. ч.) получают пенопласт марки ФК-20-А-20; в качестве наполнителя кроме стекловолокна может быть введен вспученный перлит.

Технологический процесс изготовления изделий включает следующие основные операции: смешивание компонентов и приготовление композиции; загрузку композиции в форму; вспенивание композиции и отверждение.

Приготовление композиций, не содержащих каучук, осуществляют путем предварительного дробления фенолоформальдегидного полимера до частиц размером 10...15 мм и последующего смешивания всех компонентов в шаровой мельнице, а для получения композиций, содержащих каучук, эту операцию производят на вальцах.

Полученные композиции (полуфабрикат) в виде порошков или пленки (при вальцевании) равномерно укладывают в форму и подвергают тепловой обработке, во время которой композиция претерпевает сложные физико-химические превращения. На первом этапе в камере термообработки поднимают температуру до 80...90°С в течение 30 мин и дают выдержку в течение 1...1,5 ч. В это время композиция переходит в вязкотекучее состояние, что сопровождается некоторым снижением ее объема. Конец этого этапа соответствует началу разложения газообразователя. Наиболее интенсивное газовыделение и вспенивание композиции происходят на втором этапе при температуре 90...110°С и продолжительности выдержки в течение 45...60 мин. Третий этап термообработки протекает при повышенной температуре (150...200°С), значения которой зависят от вида перерабатываемой композиции. Этот этап длится от 1,5 до 4 ч для различных композиций в зависимости от толщины слоя вспененного материала, количества введенных в композицию отверждающих и вулканизирующих добавок и вида термообработки. В это время происходят отверждение полимера и вулканизация каучука. После охлаждения производят распалубку и оправку изделий.

Пенопласты на основе новолачных фенолоформальдегидных смол марок ФФ, ФК, ФС-7 характеризуются средней плотностью от 70 до 200 кг/м³, при этом их теплопроводность колеблется в пределах 0,052 до 0,071 Вт/(м·°С), прочность при изгибе — 0,15...1,5 МПа, морозостойкость — 50 циклов, температура применения от —50 до +150°С. Пенопласты марок ФФ и ФС — самозатухающий материал, а марки ФК — горючий.

Заливочный способ применяют для получения резольных фенолоформальдегидных пенопластов, он выгодно отличается от беспрессового способа своей технологичностью, недефицитностью исходных компонентов, благодаря чему получил большое распространение в промышленности.

В качестве сырья используют резольные фенолоформальдегидные олигомеры ФРВ-1 и ФРВ-2, ФРВ-1А. Олигомер ФРВ-1 — гомогенная жидкость от вишневого до темно-коричневого цвета, со слабым запахом фенола и формальдегида, представляющая собой полидисперсную смесь первичных продуктов конденсации фенола с формальдегидом в присутствии едкого натра в качестве катализатора. Форполимер марки ФРВ-1А представляет собой смесь водорастворимого фенолоформальдегидного форполимера ФВР-1 с продуктом ОП-7 и алюминиевой пудрой марки ПАК-4. Форполимер ФРВ-2 — вязкая гомогенная жидкость вишневого цвета; по растворимости, наличию свободных фенола и формальдегида аналогичен ФРВ-1.

В качестве вспенивающего вещества применяют продукты марок ВАГ-1, ВАГ-2 и ВАГ-3. ВАГ-1 — смесь соляной и ортофосфорной кислот с мочевиной, взятых в массовом соотношении соответственно 2 : 1 : 1. ВАГ-2 — низковязкая гомогенная жидкость со слабым запахом фенола, представляющая собой диэтиленгликолевый раствор смеси сульфофенола и ортофосфорной кислоты. ВАГ-3 — гомогенная низковязкая жидкость от желтого до коричневого цвета со слабым запахом фенола, представляющая собой продукт конденсации сульфофенилмочевины с формальдегидом и ортофосфорной кислотой. Эти вещества взрывобезопасны и трудновоспламеняемы.

Технологический процесс получения пенопластов ФРП включает следующие основные операции: механическое смешивание при нормальной температуре в соответствующем соотношении форполиме-

ра и вспенивающего агента и заливка полученной композиции в полость формы или конструкции, подлежащей заполнению. Композиция вспенивается в результате экзотермической реакции окончательной поликонденсации фенолоформальдегидного форполимера с кислотным катализатором.

При использовании формополимера ФРВ-1А, содержащего алюминиевую пудру, композиция вспенивается водородом, выделяющимся при реакции кислого катализатора с алюминиевой пудрой. При использовании форполимеров ФРВ-1 и ФРВ-2 под действием экзотермической реакции поликонденсации испаряется содержащееся в полимере легкокипящее вещество, например четыреххлористый углерод, или фреон-113, пары которого вспенивают композицию. Таким образом композиция вспенивается и отверждается в изделии или форме без подвода теплоты извне.

Исходные соотношения между компонентами в рассмотренных композициях следующие, масс. ч.: 1) ФРВ-1 — 100; ВАГ-2 — 15...20; 2) ФРВ-2 — 100, ВАГ-2 — 15...20, легкокипящая жидкость — 3...8; 3) ФРВ-1а — 100 ВАГ-3 — 15...25. Точную величину этих соотношений для частных условий заливки устанавливают предварительно по результатам контрольных опытов.

Технология заливки композиции в форму или полость конструкции может быть периодической (при использовании периодически действующих смесителей) или непрерывной (при использовании машины непрерывного действия УЗФП-1). Машина УЗФП-1 состоит из двух емкостей (для форполимера и вещества ВАГ), двух насосов и смесительной головки, соединяющейся с машиной посредством двух шлангов, по которым подаются форполимер и ВАГ в необходимых количествах. Наиболее эффективно применение этой машины в сочетании с конвейерной установкой для производства изделий из заливочных пенопластов. Свойства заливочных пенопластов на основе фенолоформальдегидных полимеров приведены в табл. 13.6.

Таблица 13.6. **Основные свойства заливочных пенопластов**

Показатель	Марка	
	ФРП-1	ФРП-2
Средняя плотность, кг/м³	30 ... 100	60 ... 150
Прочность, МПа:		
при сжатии	0,05 ... 0,32	0,25 ... 0,6
при изгибе	0,06 ... 0,21	0,24 ... 0,89
Теплопроводность, Вт/(м·°С)	0,03 ... 0,04	0,033 ... 0,047
Гигроскопичность за 24 ч при 96%-ной относительной влажности, % по массе	До —25	До 25
	—	
Максимальная температура применения, °С (длительное воздействие)	От —50 до +150 ... 200	

Фенолоформальдегидные пенопласты, получаемые обоими рассмотренными способами, применяют в трехслойных стеновых панелях, плитах покрытий, для тепловой изоляции трубопроводов. Плиты пенопласта можно приклеивать на подготовленную теплоизолируемую поверхность горячими битумными мастиками, при этом слой мастики может служить одновременно пароизоляцией.

Фенолоформальдегидные пенопласты затухают после удаления источника огня, характеризуются хорошей химической стойкостью.

13.6. Карбамидоформальдегидные поропласты

Поропласты на основе карбамидоформальдегидных полимеров отличаются чрезвычайно низкой средней плотностью (до 5 кг/м³), они характеризуются сравнительно невысокой стоимостью и технологичностью. Эти поропласты отличаются наличием большого количества сообщающихся пор.

Для изготовления карбамидоформальдегидных поропластов применяют два способа: изготовление блочного (плитного) материала в стационарных условиях (на предприятиях) и заливочный способ, предусматривающий получение заливочного поропласта «на месте», т. е. в условиях строительной площадки.

Первым способом получают жесткие плиты — мипору. Для изготовления мипоры используют мочевиноформальдегидные водорастворимые полимеры, которые получают методом поликонденсации из мочевины и формалина непосредственно в цехе изготовления пенопласта.

Мочевина — диамид угольной кислоты (карбамид: $O{=}C{-}(NH_2)_2$). Она хорошо растворяется в воде и спиртах.

Формалин — водный 37...40%-ный раствор формальдегида ($HCHO$).

Для нейтрализации формалина, промежуточных продуктов и готового раствора карбамидоформальдегидного полимера используют едкий натр и муравьиную кислоту. С целью снижения хрупкости полимера при конденсации в композицию вводят глицерин. Для приготовления пены в заводских условиях применяют контакт Петрова, в рецептуру которого входят едкий натр, ортофосфорная кислота и резорцин.

Технология получения мипоры в заводских условиях состоит из подготовки сырья, приготовления раствора полимера, получения пенообразующего раствора, вспенивания полимера, отверждения и сушки.

Подготовка сырья заключается в дозировании компонентов и получении полимера в реакторе с обогревом и вакуум-отсосом. Полученный полимер разбавляют водой до 27...32%-ной концентрации в пропеллерной мешалке.

Приготовление пены осуществляют в пеновзбивателе, в который непрерывно поступает воздух. Отдозированные компоненты (упаренный контакт Петрова, ортофосфорную кислоту и воду) взбивают в пену в течение 2...3 мин. Затем в смеситель подается раствор полимера и в течение 15...20 с смешивается с пеной. Гото-

вая пеномасса заливается в формы и в них поступает в камеры отверждения. Отверждение производят в течение 4...5 ч при температуре 20°C, в результате чего образуется полимер трехмерной структуры за счет реакции поликонденсации, ускоряемой присутствием сульфокислот. Этот процесс сопровождается нарастанием вязкости, выделением влаги и усадкой материала. Сушку изделий ведут в течение трех суток с постепенным повышением температуры с 30 до 50°C. После сушки блоки мипоры выдерживают 72 ч для выравнивания влажности по объему блока и снижения температуры.

Мипора представляет собой жесткий поропласт белого цвета с открытой пористостью. Средняя плотность мипоры составляет 10...20 кг/м³, прочность при сжатии невысока (0,025...0,03 МПа), теплопроводность колеблется в пределах 0,032...0,041 Вт/(м·°C). Мипора гигроскопична и не биостойка. Вместе с тем это трудносгораемый материал с температурой применения до 100 °C.

Блочную мипору применяют в качестве теплоизоляционного материала в железнодорожном транспорте, холодильной технике. Этот материал утрачивает свое значение в строительстве из-за низкой прочности и высокой влагоемкости.

Более перспективным материалом для применения в строительстве следует считать заливочный карбамидоформальдегидный поропласт марок МФП и МФА-3.

Для приготовления поропласта МФП применяют готовый мочевиноформальдегидный полимер МФ-1, который представляет собой 40...50%-ный раствор продуктов конденсации мочевины с формальдегидом.

Для вспенивания «на месте» применяют продукт АВО — раствор контакта Петрова, ортофосфорной кислоты и резорцина в воде. Перед применением этот продукт разбавляют водой в соотношении 1 : 9.

Для снижения горючести в композицию вводят фосфорнокислый аммоний. Продукт АВО является также и отверждающим агентом.

Приготовление заливочного поропласта производят на установке непрерывного действия, полученную пеномассу заливают непосредственно в строительные конструкции, где она отверждается и высушивается.

Принцип получения пеномассы заключается в том, что к водному раствору поверхностно-активного вещества и катализатора отверждения, предварительно вспененному сжатым воздухом и находящемуся в смесителе, быстро добавляют водную дисперсию полимера МФ-1. По мере смешивания пеномасса вытекает через гибкий шланг в полость изолируемой конструкции, а в смеситель в соотношении 1 : 1 подаются компоненты (МФ-1 и АВО), обеспечивая непрерывность процесса. Пеномасса, залитая в полость конструкции, быстро густеет и примерно в течение 2...3 ч полностью теряет текучесть в результате желатинизации. Высыхание пеномассы длится в естественных условиях 2...3 сут. При желатинизации и

сушке имеет место усадка пеномассы, которую устраняют путем дополнительного подлива пены в образовавшиеся щели.

В настоящее время применяют поропласт МФА-3, который приготавливают из концентрированных карбамидных смол (концентрации не менее 65%). Этот поропласт отличается меньшим содержанием влаги и меньшей технологической усадкой по сравнению с поропластами марок МФП.

13.7. Пенопласты на основе полиуретанов

Полиуретановые пенопласты — наиболее перспективные теплоизоляционные полимерные материалы, обладающие комплексом ценных физико-механических и технологических свойств. Их производство постоянно возрастает, в том числе для строительства.

Исходным сырьем для получения пенополиуретана служат диизоцианат, а в качестве второго компонента — простые и сложные полиэфиры с концевыми гидроксильными группами. При получении эластичных пенополиуретанов используют линейные полиэфиры с молекулярной массой 750...6000, а для жестких пенопластов применяют разветвленные — полиэфиры. Для снижения горючести в состав полиэфиров вводят хлор, с этой целью полимер модифицируют хлоралем. При изготовлении самозатухающего пенополиуретана в композицию вводят фосфорсодержащие олигомеры.

Непременным компонентом полиуретановых композиций является катализатор. Только в его присутствии происходит реакция образования полиуретана. Кроме того, он создает возможность согласовывать реакцию образования полиуретана с его вспениванием и отверждением. В качестве катализаторов применяют соли олова, амины или их смеси. В состав композиции вводят эмульгаторы, которые способствуют получению материала с мелкой равномерно распределенной пористостью. Наиболее широко для этой цели применяют вещества ОП-7 и ОП-10, представляющие собой смеси полиэтиленгликолевых эфиров, моно- и диалкилфенолов. В качестве газообразователей применяют фреон-11 или фреон-113.

В состав рецептуры для получения пенополиуретана могут входить дистиллированная вода, антипирены, красители.

Технология эластичного пенополиуретана складывается из следующих производственных операций: смешивания полиэфира, диизоцианата, эмульгатора и катализатора в рабочей емкости (процесс идет непрерывно, компоненты перекачиваются из расходных емкостей через дозирующие устройства и поступают в смеситель); заливки полученной композиции на непрерывно движущуюся ленту пластинчатого транспортера; тепловой обработки при температуре 90°C, которая осуществляется непосредственно на транспортере; охлаждения полученной ленты пенопласта, наматывания ее на барабаны и последующего раскроя на плиты, ковры; выдержки; упаковки изделий и складировании.

Пористая структура в материале образуется за счет выделения CO_2, обусловленного взаимодействием диизоцианатов и воды. Одновременно идет процесс образования трехмерной структуры полимера. Реакция происходит при двойном избытке диизоцината в присутствии катализатора. Реакция экзотермична, масса нагревается до 70°С, что ускоряет процесс отверждения.

Жесткие пенополиуретаны получают методами заливки и напыления. Приготовление исходной смеси аналогично предыдущему. Приготовленную смесь заливают в формы или непосредственно в полости строительных конструкций. При напылении смесь наносят на изолируемую поверхность пистолетами-распылителями слоем 8...10 мм. В этих случаях готовят две смеси, которые заливают в две расходные емкости: смесь полиэфиров с катализатором и эмульгатором и смесь изоцианатов. Заливку или напыление композиции производят через смеситель, обеспечивая соотношение смесей 1 : 2 по массе. Для ускорения процесса отверждения полимера смеси можно предварительно подогревать до 50...60°С.

Получение пенополиуретанов связано с применением токсичных веществ и с выделением вредных паров и газов. Поэтому при работе с этими смесями необходимо применять интенсивную вентиляцию.

Эластичные пенополиуретановые изделия, выпускаемые под марками ППУ-Э, ППУ-ЭМ, ППУ-ЭТ, характеризуются открытой сообщающейся пористостью, их средняя плотность колеблется в пределах 30...50 кг/м³, теплопроводность не выше 0,032 Вт/(м·°С), температура применения от —15 до +100°С, прочность при растяжении не менее 0,12 МПа.

Эластичные пенополиуретаны применяют для утепления полов, герметизации стыков панелей и рам, как прокладочный и амортизационный материал.

Жесткие пенополиуретаны марок ППУ-3, ППУ-9Н, ППУ-317, ПУ-101 и других характеризуются средней плотностью от 60 до 200 кг/м³, их теплопроводность колеблется от 0,03 до 0,052 Вт/(м·°С), а прочность при сжатии — от 0,2 до 2,5 МПа. Пористость этой разновидности пенопластов преимущественно замкнутая, температура применения от —60 до +170°С; жесткие пенополиуретаны стойки к действию бензина, керосина, масел. Они нашли довольно широкое распространение в строительстве. Их применяют в качестве теплоизоляционного слоя в легких стеновых панелях, плитах покрытий, тепловой изоляции трубопроводов, холодильных камер, а также в виде теплоизоляционной заливки различных полостей ограждающих конструкций зданий и сооружений. В процессе эксплуатации пенополиуретаны не выделяют вредных веществ.

13.8. Сотопласты

Сотопласты — это материалы с герметически правильной структурой ячеек, образованных различными полимерными материалами путем пропитки полимерными композициями различных видов бумаги, ткани, склеивания гофрированных материалов из фольги, картона и т. п. Ячейки сотопластов могут иметь шестигранную, ромбовидную, квадратную, синусоидальную и другие формы. Чаще всего изготовляют бумажные сотопласты на основе изоляционно-пропиточной бумаги, крафт-бумаги или битумизированной бумаги. Для тканных сотопластов применяют бязь, стеклоткань.

Для проклеивания и пропитки сот используют карбамидные, фенолоформальдегидные, эпоксидные и полиэфирные полимеры.

Применяют несколько методов изготовления сотопластов: склеивание профилированных листов, растяжку пакетов, объемное формование.

По первому методу ткань или бумагу пропитывают жидким полимером, сушат листы, а затем прессуют их в профилированные заготовки. На выступы (гофры) заготовок наносят клей и собирают из них блоки заданной толщины. Профилированные заготовки можно также покрывать плоскими листами и склеивать их при прогреве в трехслойной панели.

При получении сотопластов вторым методом бумага или ткань наматывается на металлическую основу (барабан). При этом на поверхность наносят полоски клея, по которым бумага (ткань) склеивается. Затем ее разрезают на полосы, растягивают и пропитывают раствором полимера. После сушки и отверждения полимера сотоблоки приобретают стабильную форму и достаточно высокие жесткость и прочность.

Третьим методом соты формируют на специальном ткацком станке из хлопчатобумажных, стеклянных, асбестовых, металлических и других нитей. Благодаря переплетению нитей в узлах ячеек соты приобретают высокую прочность. Снятые со станка соты пропитывают раствором полимера и в зависимости от его вида подвергают тепловой обработке при необходимых для данного полимера параметрах.

В отличие от пенопластов средняя плотность сотопластов не связана прямой зависимостью с прочностными и теплотехническими характеристиками материала. Свойства сотопластов в основном зависят от формы и размера ячеек сот, прочности основы, вида полимера, применяемого для пропитки, правильности проведения технологического процесса. Сотопласты являются анизотропным материалом, поэтому их прочность и теплопроводность зависят от направления приложения нагрузки и направления движения теплового потока по отношению к расположению ячеек.

Средняя плотность сотопластов обычно находится в пределах 60...90 кг/м³, прочность составляет 1,2...1,4 МПа при действии сжимающей силы параллельно стороне ячеек и 0,15...0,12 МПа — перпендикулярно стороне ячеек. Теплопроводность колеблется от 0,09...0,096 Вт/(м·°С) при направлении теплового потока параллельно стенке ячеек до 0,07 Вт/(м·°С) при перпендикулярном тепловом потоке.

Для уменьшения конвекции заполняют ячейки сотопластов высокопористым сыпучим материалом, например крошкой мипоры, силипором. В этом случае теплопроводность сотопластов существенно понижается.

Сотопласты применяют для изготовления стеновых панелей, плит перекрытий и покрытий и чаще всего для утепления дверей и облегчения внутренних перегородок.

13.9. Перспективы развития производства и применения пенопластов

Современное строительство базируется на использовании эффективных легких ограждающих конструкций, среди которых все шире применяют конструкции с теплоизоляционным слоем из газонаполненных пластмасс. Газонаполненные пластмассы занимают особое место среди теплоизоляционных материалов, применяемых в современном строительстве, что обусловлено их низкой средней плотностью и самой низкой в сравнении с другими материалами теплопроводностью. Вместе с тем пенопластам свойственны такие отрицательные качества, как недостаточная эксплуатационная стойкость, особенно в условиях повышенной влажности, повышенных температур, солнечной радиации, а также повышенная горючесть. Существенными недостатками, сдерживающими широкое применение пенопластов в строительстве, являются их дефицитность из-за недостаточной развитости сырьевой базы и сравнительно высокая стоимость. Это влечет за собой не всегда оправданное удорожание конструкций с теплоизоляцией из пенопластов.

В этой связи использование пенопластов в качестве утеплителя наиболее целесообразно в конструкциях, обладающих низкой паропроницаемостью и высокой пожаробезопасностью.

Весьма эффективно применение некоторых видов пенопластов для теплоизоляции трубопроводов бесканальной и канальной прокладки, в легких ограждающих конструкциях с массой 1 м² 15...30 кг.

В СССР предусмотрено дальнейшее развитие производства и применения в строительстве газонаполненных пластмасс на основе полистирола, фенолоформальдегидных композиций, жестких пенополиуретанов, мочевиноформальдегидных смол и композиционных пенопластов.

Получение пенополистирола строительного назначения предусматривается на конвейерных установках и в крупногабаритных формах. Разработаны технология и оборудование для производства изделий средней плотности 16...18 кг/м³ в крупногабаритных формах методом импульсного теплового удара, а также непрерывным методом термосжатия — спекания. Последний метод основан на предварительном вспенивании гранулята до насыпной плотности 8...16 кг/м³ с последующим спеканием при одновременном сжатии на специальных установках непрерывного действия.

Дальнейшее развитие получат фенольные пенопласты, которые в сравнении с другими пенопластами характеризуются более высокой теплостойкостью (до 150°С) и относятся к группе трудносгораемых материалов. Предусматривается расширение производства заливочных фенольных пенопластов в сочетании с легкими минеральными высокопористыми наполнителями.

Жесткие пенополиуретаны, обладающие ценным сочетанием важных свойств (высокой адгезией практически ко всем материалам, низкими показателями средней плотности и теплопроводности, высокими механическими характеристиками и удовлетворительной эксплутационной стойкостью), являются весьма перспективным материалом, уже нашедшим широкое применение в мировой строительной практике. Наиболее эффективно применение жестких пенополиуретанов в легких ограждающих конструкциях в виде штучных изделий, изготовленных на конвейерных линиях, напыляемых пенопластов для изоляции металлических поверхностей резервуаров, трубопроводов, кровель. Ведутся интенсивные исследования по созданию огнестойких пенополиуретановых композиций.

Мочевиноформальдегидные пенопласты (МФП-1, МФП-2, БТП) отличаются простотой изготовления и высокой эффективностью применения, особенно при устройстве тепловой изоляции кирпичных стен с пустотами. Стена толщиной в один кирпич со слоем пенопласта толщиной 5 см по теплотехническим показателям превосходит кирпичную стену толщиной 60 см. Это позволяет при возведении такого ограждения снизить в 2 раза расход кирпича и в 1,5...2 раза сократить сроки строительства.

Особого внимания заслуживают композиционные пенопласты, представляющие собой органоминеральные материалы, состоящие из высокопористых пенопластов, наполненных высокопористыми гранулами перлита, стеклопора, особо легкого керамзита и др. В СССР получили развитие композиционные пенопласты на основе тонкодисперсных наполнителей и порошкообразных полимеров, например, фенолоформальдегидных смол новолачного типа — перлитопластобетон, выпускаемый на комбинате «Стройполимер». В ряде научных организаций и учебных заведений ведутся интенсивные исследования по созданию новых эффективных видов композиционных пенопластов с повышенными физико-механическими, теплофизическими и эксплуатационными свойствами.

13.10. Техника безопасности на предприятиях газонаполненных пластмасс

На предприятиях, производящих полимерные теплоизоляционные материалы в зависимости от вида используемых полимеров, их композиций и способа получения изделий, возникают опасности взрыва, пожара, отравления работающих токсичными газообразными веществами. Для предотвращения возникающих опасностей необходимо хорошо знать свойства используемых сырьевых мате-

риалов, их композиций и наиболее вероятные места возможного возникновения той или иной опасности в технологической линии.

При производстве пенополистирола (ПСБ) пожарная опасность существует как при хранении суспензионного полистирола, так и при производстве, хранении и обработке пенополистирольных изделий.

При хранении суспензионного полистирола выделяется изопентан, который способен образовывать взрывоопасную смесь (нижняя граница взрыва 1,4% по объему; температура воспламенения 285°С). Кроме того, он склонен к образованию электростатических зарядов. Искровые или кистевые разряды от полистирола к стенкам резервуара могут воспламенить изопентан-воздушную смесь. Поэтому помещение хранения изопентана относится к категории взрывоопасных.

Со склада в производственные помещения сырье доставляют пневмотранспортом, который должен быть снабжен устройством для отвода статического электричества и пожарозащитными заслонками.

Технологические операции (первичное и вторичное вспенивание) при обработке паром пожарной опасности не представляет. Однако при первичном вспучивании выделяется наибольшее количество паров стирола — весьма токсичного вещества. Поэтому необходимо в этих местах устраивать местные отсосы воздуха, а в цехе — принудительную вентиляцию.

При сушке и выдержке предвспененных гранул следует учитывать, что из 1 т гранул может выделяться до 20 кг изопентана. Для предотвращения взрывоопасной ситуации необходимо соизмерить количество хранящихся гранул с объемом помещения, не допуская достижения опасной концентрации изопентана (1,4% по объему). Помещение хранения должно быть отгорожено брандмауэром, оборудовано стационарными спринклерными, паровыми или углекислотными огнетушителями.

Так как пенополистирол (ПСБ) легкогорючий материал, то склады для его хранения также оборудуют огнетушителями и вытяжкой. Вытяжка необходима вследствие выделения токсичного стирола в случае загорания продукции, которое может произойти от спички или от искры при производстве сварочных работ.

Производство поливинилхлоридного пенопласта менее пожароопасно. Его температура воспламенения около 600°С, однако при температуре 160°С он начинает выделять HCl. Применяемые в качестве пластификаторов метилметакрилат и битулфталат более пожароопасны (для метилметакрилата температура вспышки 8°С, а температура самовоспламенения 460°С).

Пожарная профилактика и промышленная гигиена на предприятиях поливинилхлорида аналогичны применяемым при производстве пенополистирола.

По пожароопасности процесс производства пеновинилхлорида относится к классу В; по правилу устройства электроустановок — классу П-11.

Технология пенополиуретанов связана с использованием значительного количества горючих и токсичных веществ. Поэтому это производство представляет значительную пожарную и санитарную опасность. Пенополиуретан — легкогорючее вещество, при горении и разложении которого выделяется большое количество токсичных паров и газов.

Наиболее опасной операцией следует считать вспенивание, когда при заливке смеси горючих жидкостей в открытые бумажные формы идут экзотермические реакции с выделением токсичных паров и газов. При этом температура массы повышается до 70...90°С. В этом месте необходимо устройство вытяжки и эффективной вентиляции с целью недопущения повышенной концентрации выделяющихся газов.

Практически на всех постах технологического процесса эффективная вентиляция и вытяжки строго обязательны. При напылении полиуретановых композиций необходима индивидуальная защита органов дыхания и кожи (пневмокостюмы, скафандры, резиновые перчатки).

Тушить пенополиуретан рекомендуется водой. При этом следует обязательно применять изолирующие или фильтрующие противогазы с патронами Б и М, так как при горении и разложении пенополиуретана выделяются пары изоцианатов, цианистый водород и другие токсичные пары и газы.

Производство фенолоформальдегидных пенопластов не относится к категории пожаро- или взрывоопасных. Но при заливке композиций выделяются газы, которые могут содержать в своем составе фенол, формальдегид, пары кислот и т. п. Поэтому для соблюдения санитарных норм производственные помещения должны быть оснащены хорошей вентиляцией. Рабочие должны быть обеспечены средствами индивидуальной защиты: противогазами марки М, очками, резиновыми перчатками.

ЧАСТЬ V

ТЕХНОЛОГИЯ ЖАРОСТОЙКИХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Особое место в технологии теплоизоляционных материалов занимает производство изделий для устройства тепловой изоляции энергетического, металлургического, нефтеперерабатывающего и другого промышленного оборудования с температурой изолируемой поверхности 600...1600°С. Определяя эффективность применения жаростойких теплоизоляционных материалов для промышленных тепловых агрегатов, учитывают два основных фактора: а) повышение эксплуатационных показателей работы тепловых агрегатов, а также службы самих теплоизоляционных материалов; б) повышение индустриализации строительных работ при возведении и ремонте промышленных печей и другого промышленного оборудования.

Применение жаростойких теплоизоляционных материалов в промышленности должно обеспечивать: снижение затрат теплоты и продолжительности разогрева ограждающих конструкций тепловых агрегатов; уменьшение потерь теплоты через ограждающие конструкции тепловых агрегатов вследствие снижения теплопроводности; снижение расхода основных, как правило дефицитных и дорогостоящих, материалов на возведение тепловых агрегатов и уменьшение массы строительных конструкций агрегатов; защиту технологического оборудования и строительных конструкций производственных помещений от вредного воздействия высоких температур; создание нормальных условий для труда людей в горячих цехах.

Степень экономической эффективности тепловой изоляции промышленного оборудования часто оценивают коэффициентом сбережения теплоты η, который выражают отношением

$$\eta = (Q_1 - Q_2)/Q\ 100,$$

где Q_1 и Q_2 — соответственно потери теплоты тепловой установкой или трубопроводом до и после устройства тепловой изоляции.

При обеспечении хорошей теплоизоляции η достигает 95...97%. Практика показывает, что, например, при правильном устройстве тепловой изоляции трубопровода, температура поверхности которого 400°С, обеспечивается экономия 10,7 условного топлива в год с 1 м^2 изолированной поверхности.

Наибольший эффект дает тепловая изоляция при ее установке на внутренней части футеровки, т. е. в непосредственной близости к источнику теплоты. В этом случае за счет малой теплоемкости теплоизоляционных материалов ускоряется разогрев тепловой установки, снижаются потери теплоты на аккумуляцию и излучение, появляются возможности уменьшения толщины и массы ограждающих конструкций тепловых аппаратов. Особенно эффективна такая теплоизоляция в тепловых установках периодического действия. В идеальном случае теплоизоляционные материалы должны не только выполнять свои функциональные задачи — снижение теплопроводности ограждающих конструкций, но и обладать конструкционными свойствами, обеспечивающими длительную службу теплового агрегата. В этом случае достигается максимальный эффект от применения жаростойких теплоизоляционных материалов. Расчеты, а теперь уже и практика показывают, что при рациональном устройстве ограждающих конструкций тепловых установок и при использовании новых прогрессивных теплоизоляционных материалов (например, волокнистых) можно снизить массу тепловых аппаратов в 9...12 раз, а теплоемкость ограждений — в 8...11 раз, что очень важно, особенно для тепловых установок периодического действия.

В настоящее время в СССР производится широкий ассортимент жаростойких теплоизоляционных материалов для различных условий службы. Так, электроэнергетика использует минеральную и стеклянную вату и изделия из этого вида минеральных волокон (температура применения до 600°С), известково-кремнеземистые изделия (рабочая температура от 450 до 750°С), изделия из перлита, вермикулита, асбестосодержащие массы (рабочая температура до 800°С); промышленность строительных материалов применяет диатомитовые обжиговые изделия (рабочая температура 800...850°С), перлитокерамические изделия (до 1000...1100°С); в металлургии широко применяют легковесные огнеупоры (шамотные, высокоглиноземистые, корундовые и др.), температура применения которых находится в пределах 1150...1600°С.

В последнее время широкое применение получили волокнистые жаростойкие теплоизоляционные материалы, получаемые на основе огнеупорных волокон и отличающиеся высокими теплоизоляционными и эксплуатационными свойствами.

Необходимость изготовления большого числа видов жаростойких теплоизоляционных материалов и изделий диктуется, с одной стороны, экономическими соображениями, а с другой — многообразием условий их службы и, следовательно, различием требований, предъявляемых к ним современной техникой высоких температур. Главными такими требованиями являются: низкая теплопроводность при высоких температурах, высокая термическая стойкость, определяющая продолжительность службы материалов в данных условиях эксплуатации, необходимая огнеупорность, в ряде случаев — высокая химическая (коррозионная) и эрозионная стойкость и др.

В учебнике рассматриваются широко применяющиеся виды жаростойких теплоизоляционных материалов, а также новые пер-

спективные материалы, производство которых начало развиваться в последние десятилетия. Наибольшее внимание уделено новым технологическим приемам, позволяющим существенно снизить энергоемкость производства, а также применять побочные продукты и отходы других отраслей.

ГЛАВА 14

АСБЕСТОСОДЕРЖАЩИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Асбестосодержащие теплоизоляционные материалы выпускают в виде изделий (плит, скорлуп, сегментов) и сухих смесей, предназначенных для устройства мастичной изоляции. Главным потребителем асбестосодержащих теплоизоляционных материалов является электроэнергетика (тепловая изоляция трубопроводов, котельных и других установок с температурой поверхности до 600°C).

В зависимости от состава сырья асбестосодержащие теплоизоляционные материалы можно разделить на следующие группы.

Асбестоизвестково-кремнеземистые (известково-кремнеземистые) изделия — ИКИ получают из асбеста, извести и кремнеземистого компонента (песка, трепела или диатомита) с применением автоклавной обработки. Известна разновидность ИКИ под названием «вулканит» *.

Асбестодоломитовые материалы (совелит) изготовляют из доломита и асбеста в виде формованных изделий (плит, скорлуп, сегментов) и порошка, получаемого дроблением бракованных изделий и предназначенного для мастичной изоляции. В настоящее время совелит выпускают в небольшом количестве. Этот материал нельзя считать эффективным из-за его повышенной средней плотности (350 ... 400 кг/м³) по сравнению с ИКИ и довольно высокой энергоемкости технологии, поэтому дальнейшее развитие производства совелита не намечается.

Асбестотрепельные (диатомитовые) композиции — сыпучие порошкообразные смеси, состоящие в основном из асбеста, диатомита или трепела. Наиболее распространенным материалом является асбозурит, состоящий из 15 ... 30% (по массе) асбеста и 70 ... 85% диатомита или трепела. Материалы с добавками слюды, шиферных отходов, вермикулита называют асбослюдой, асботермитом, асбозонолитом. Все они предназначены для мастичной тепловой изоляции горячих поверхностей.

---

* При организации производства асбестоизвестково-кремнеземистых материалов составной частью сырьевой смеси был вулканический пепел, что нашло отражение в названии изделий.

14.1. Асбест и его свойства

Асбестом называют минералы группы серпентинов или амфиболов волокнистого строения, способные при механическом воздействии разделяться на тончайшие волокна.

По химическому составу асбестовые минералы являются водными силикатами магния, железа, кальция и натрия. Содержание воды в асбесте группы серпентина составляет 13 ... 14%, а группы амфибола — 1,5 ... 3% в зависимости от вида. Волокнистое строение наиболее ярко выражено у асбеста серпентиновой группы, куда относится лишь один вид асбеста — хризотил-асбест. Мировые запасы хризотил-асбеста намного превышают запасы амфиболовых асбестов. На их долю приходится 96% мировой добычи асбеста. В СССР имеется ряд крупных разрабатываемых месторождений асбеста: Баженовское (Средний Урал), Ак-Довуракское (Тувинская обл.), Джетыгаринское (Кустанайская обл.), Киембаевское (Оренбургская обл.). За рубежом наиболее крупные месторождения хризотил-асбеста имеются в Канаде и Южной Африке.

Из амфиболовых асбестов наибольшую промышленную ценность представляют крокидолит и амозит, самые крупные месторождения которых расположены в Африке. В СССР также имеется месторождение амфиболовых асбестов на Урале.

Амфиболовые асбесты отличаются более высокими кислото- и теплостойкостью.

По химическому составу хризотил-асбест является водным силикатом магния — $3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$. В составе хризотил-асбеста могут быть загрязняющие минеральные примеси, некоторые из них снижают свойства асбеста. Например, наличие карбоната кальция, который цементирует элементарные кристаллы асбеста, влечет за собой снижение эластичности волокон и их распушиваемости. Вода в асбесте содержится в виде конституционной и адсорбционной. Содержание воды и прочность ее связи с материалом в значительной степени определяют свойства асбеста и условия его применения.

Асбест имеет кристаллическую структуру волокнистого строения. Волокна асбеста характеризуются гексагональной плотной упаковкой элементарных волокон (фибрилл). Каждая фибрилла представляет собой трубку с внутренним диаметром 30 ... 60 Å и наружным — 300 ... 400 Å. Расщепляемость асбеста чрезвычайно высока. Волокно хризотил-асбеста, как бы тонко оно не было, состоит из огромного числа параллельно расположенных тончайших элементарных волокон. Плотность хризотил-асбеста в зависимости от содержания химически связанной воды и железа находится в пределах 2,4 ... 2,6 г/см³.

Хризотил-асбест обладает высокой прочностью на разрыв по оси волокнистости. Наибольшей прочностью характеризуются волокна асбеста, осторожно отделенные от кускового материала. После деформации изгиба или скручивания механическая проч-

ность волокон существенно снижается. Прочность при растяжении недеформированных волокон колеблется в пределах 22 ... 36,5 МПа, что значительно превышает прочность многих натуральных и искусственных волокон органического и неорганического происхождения, в том числе и стальных.

Асбест несгораем, однако при высоких температурах в нем происходят процессы, которые резко изменяют его физические свойства.

В результате нагревания до 370°С хризотил-асбест теряет адсорбционную воду, при этом уменьшается его прочность. При охлаждении асбест вновь присоединяет к себе воду и прочность его восстанавливается. При температуре выше 370°С начинается удаление химически связанной (конституционной) воды. При этом уже нарушается структура молекулярной решетки, что приводит к потере прочности и разрушению волокон. Потеря конституционной воды — процесс необратимый. Интенсивная дегидратация хризотил-асбеста происходит при температуре 600 ... 700°С, поэтому температура применения этого вида асбеста ограничивается 600°С.

Горную породу, содержащую асбест, добывают открытым способом и подвергают механическому обогащению.

Товарный хризотил-асбест состоит из смеси волокон различной длины и их агрегатов. Агрегаты волокон асбеста с недеформированными волокнами размером в поперечнике более 2 мм называют кусковым асбестом, а менее 2 мм — иголками. Распушенным называют асбест, в котором тонкие волокна деформированы и перепутаны. Частицы сопутствующей породы и асбестовое волокно, прошедшие через сито с размерами сторон в свету 0,25 мм, называют «пылью».

В зависимости от длины волокон хризотил-асбест подразделяется на восемь сортов:

Сорт асбеста . . .	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Длина волокна (средняя), мм .	16	12	9	5,5	2,5	1	0,7	Не нормируется

Первые три сорта асбеста считаются длинноволокнистыми и относятся к текстильным сортам, а последние сорта — коротковолокнистыми, их называют строительными. В зависимости от текстуры (степени сохранности агрегатов волокон) асбест подразделяют на жесткий (Ж), в котором преобладают иголки; полужесткий (П) — с равным количеством иголок и распушенного волокна; мягкий (М) — с преобладающим количеством распушенного волокна. Длину волокна оценивают как величину остатка на сите (% по массе). Условное обозначение марок асбеста включает три этих признака. Например, асбест мягкой текстуры VI сорта, дающий 30% остатка на сите, имеет марку М-6-30. Асбест самых коротковолокнистых

сортов негарантированной текстуры характеризуется маркой, которая указывает его сорт и среднюю плотность. Например, марка асбеста VIII сорта со средней плотностью 750 кг/м^3 обозначается так: 8-750.

В производстве теплоизоляционных материалов в основном применяют коротковолокнистые сорта асбеста: VI, VII и VIII, значительно реже V.

Введение асбестового волокна в формовочные смеси при изготовлении теплоизоляционных материалов преследует снижение средней плотности и повышение прочности материала, а также предотвращение трещинообразования как в процессе сушки изделий, так и в период их эксплуатации. Понижение средней плотности изделий происходит вследствие высокой водоудерживающей способности волокон асбеста. При этом чем тоньше распушен асбест, тем больше количество воды он может удерживать не расслаиваясь. Последующее удаление воды сушкой приводит к образованию мелкопористой структуры. Наибольшей водоудерживающей способностью обладают хорошо распушенные коротковолокнистые сорта асбеста. Повышение прочности изделий и предотвращение трещинообразования достигается за счет армирующего действия волокон асбеста и снижения усадочных деформаций при наличии достаточного количества волокон асбеста в формовочной массе. Для достижения этих целей предпочтительно применять более длинные волокна (VI и V сортов).

14.2. Технология известково-кремнеземистых изделий (ИКИ)

ИКИ изготовляют из асбеста, извести и кремнезема. Изделия формуют либо путем заливки формовочной массы в формы, либо применяя метод фильт-прессования.

Литьевая технология. В этом случае технологический процесс складывается из подготовки сырьевых компонентов, приготовления формовочной массы с большим содержанием воды, формования изделий на заливочном столе, автоклавной обработки и сушки отформованных изделий.

Подготовка сырьевых компонентов сводится к распушке асбеста, которая может осуществляться по двухступенчатой схеме: полусухая распушка при влажности 15 ... 25% на бегунах, затем мокрая распушка при влажности 120 ... 150% ы быстроходных смесителях в течение 15 .. .20 мин или путем многократного пропускания пульпы через центробежный насос.

Кремнеземистый компонент подвергают при необходимости сушке и диспергированию (помол песка, обработка диатомита на молотковой дробилке), после чего его можно непосредственно дозировать в смеситель для получения известково-кремнеземистого шлама или разводить водой для получения перекачиваемой по трубопроводу суспензии.

Известь дробят на щековых дробилках, измельчают в мельницах различного типа и разбавляют водой для получения известкового молока.

Наиболее эффективной технологией получения известково-кремнеземистого шлама является совместный мокрый помол извести и кремнеземистого компонента в вибромельнице. В качестве кремнеземистого компонента чаще применяют диатомит.

Весьма важным фактором, влияющим на теплоустойчивость ИКИ, является основность известково-кремнеземистой смеси. Как известно, большей тепловой устойчивостью обладают низкоосновные гидросиликаты кальция типа CSH(B). Поэтому при изготовлении ИКИ используют известково-кремнеземистую смесь, в которой соотношение C/S колеблется в пределах 0,6 ... 0,8.

Формовочную массу приготавливают путем смешивания асбестовой пульпы и известково-кремнеземистого шлама в смесителях до получения гомогенной смеси. Содержание асбеста в формовочной массе колеблется от 15 до 25% по массе. В зависимости от заданной средней плотности изделий, вида кремнеземистого компонента и расхода асбеста, определяющих нерасслаиваемость формовочной массы, водосодержание последней может изменяться в широких пределах — от 150 до 450%. Увеличение водосодержания приводит к снижению средней плотности изделий, однако резко увеличивает энергоемкость производственного процесса. Эффективным приемом снижения массы изделий является введение в формовочную смесь на стадии ее приготовления воздухововлекающих добавок.

Формование изделий производится методом заливки форм на специальном разливочном столе, откуда формы с массой подаются на автоклавные вагонетки и после формирования пакетов направляются в автоклав. Автоклавную обработку изделий производят при давлении 0,8 ... 1,1 МПа, ее продолжительность в случае применения в качестве кремнеземистого компонента диатомита составляет 6 ... 8 ч, а при использовании известково-песчаных смесей 8 ... 12 ч. Это объясняется большей активностью диатомитов, сложенных из аморфного кремнезема.

Сушка изделий осуществляется без форм в туннельных сушилках при температуре 120 ... 180°C; теплоносителем являются дымовые газы или горячий воздух. Продолжительность сушки — около 24 ч. Как правило, после сушки наблюдается заметное снижение прочности изделий, особенно при использовании в качестве теплоносителя дымовых газов с повышенным содержанием диоксида углерода. Это явление можно объяснить карбонизацией $Ca(OH)_2$, не вступившего в реакцию с SiO_2, и образованием не связанных между собой $CaCO_3$ и кремнезема. При увлажнении теплоносителя снижение прочности изделий уменьшается, однако продолжительность процесса сушки увеличивается.

ВНИИТеплопроектом разработан совмещенный способ тепловлажностной обработки и сушки ИКИ. Этот способ предусматривает проведение сушки под давлением в автоклаве. Тепловлажностную обработку изделий осуществляют обычным методом, подавая в автоклав насыщенный водяной пар, а сушат их путем перегрева пара. Для перегрева автоклав оборудуют специальными нагревательными панелями (рис. 14.1). Теплоносителем для нагрева панелей служит высококипящая жидкость, например дифенильная смесь. Температура теплоносителя, циркулирующего в нагревательных панелях, должна быть около 350°C, что соответствует для дифенильной смеси давлению насыщенного пара 0,45 МПа. При перегреве пара, находящегося в автоклаве, вода из изделий испаряется в окружающую их среду, давление в автоклаве растет и по достижении заданной величины пар стравливается через настроенный на это давление клапан. Таким образом, в автоклаве одновременно протекают два процесса: структурообразование и сушка изделий. Температура перегрева пара 230...240°C. Весь процесс продолжается не более 24 ч, т. е. на 10...12 ч быстрее, чем при раздельном способе тепловой обработки.

Рис. 14.1. Автоклав с нагревательными панелями:

1 — автоклав; 2 — вагонетка; 3 — нагревательные панели; 4 — известково-кремнеземистые изделия; 5 — котел для получения теплоносителя

После распалубки изделия подвергают механической обработке для придания им точных размеров и заданной формы.

Фильтр-прессовая технология. Состав гидромассы, подготовка и помол известково-кремнеземистого шлама при фильтр-прессовом методе принимают такими же, как и при литьевой технологии Полученную гидромассу разбавляют водой до В/Т = 13...14 и нагревают острым паром до температуры 95...98°C непосредственно в смесителе. После выдерживания гидромассы при температуре 95°C в специальной емкости в течение 2... 3 ч из нее формуют изделия фильтр-прессовым методом на специальном прессе. Отформованные изделия с влажностью 78...80% помещают в контейнер и направляют в автоклав, в котором производится их гидробаротермальная обработка, совмещенная с сушкой. По окончании тепловой обработки изделия в контейнере подают на склад готовой продукции, где их снимают с полок контейнера и складируют, укладывая в штабеля.

Фильтр-прессовая технология в сравнении с литьевой позволяет упростить технологический процесс, улучшить санитарные условия за счет исключения операций по распалубке и обработке изделий, чистке и смазке форм. Следует отметить, что сушка под давлением в автоклаве практически исключает снижение прочности изделий, которое имеет место при двустадийной тепловлажностной и тепловой обработке.

Недостатком фильтр-прессового способа следует считать невысокую производительность прессового оборудования.

Свойства известково-кремнеземистых изделий. Выпускающиеся в настоящее время известково-кремнеземистые изделия характеризуются следующими показателями основных свойств: средняя плотность — от 200 до 350 кг/м³; прочность при изгибе — от 0,35 до 0,49 МПа; теплопроводность в сухом состоянии при температуре 25°С — от 0,058 до 0,081 Вт/(м·°С); максимальная температура применения 600°С.

14.3. Асбестодиатомитовые массы для мастичной теплоизоляции

Асбестодиатомитовые материалы выпускают в виде порошкообразной сыпучей массы, которую на месте производства работ затворяют водой, получая мастики. В зависимости от состава сыпучих масс различают несколько разновидностей асбестодиатомитовых мастичных материалов.

Асбозурит — наиболее распространенный вид мастичного материала, он представляет собой смесь молотого диатомита с асбестом VI ... VII сортов, добавляемым в количестве не менее 15% по массе. Иногда в смесь добавляют до 5% гашеную известь.

В затвердевшем виде (после высыхания на изолируемой поверхности) этот материал характеризуется следующими показателями свойств: средняя плотность — от 450 до 650 кг/м³; прочность при изгибе — 0,1 ... 0,15 МПа; теплопроводность — 0,093 ... 0,25 Вт/(м×°С).

Асботермит вырабатывается в основном из промышленных отходов. Он представляет собой смесь молотых отходов шифера (70% по массе), асбеста VI сорта (15%) и молотого диатомита (15%). Этот материал характеризуется следующими свойствами: средняя плотность — не более 550 кг/м³; прочность при изгибе — не менее 0,18 МПа; теплопроводность — не выше 0,11 Вт/(м·°С).

В небольшом количестве для местных нужд при наличии необходимых сырьевых материалов приготовляют и другие виды мастичных асбестосодержащих смесей. Однако все эти материалы для устройства тепловой изоляции малоэффективны, а работа с ними требует больших затрат ручного труда. В современной практике мастичная теплоизоляция по этим причинам не находит широкого применения.

ГЛАВА 15

КЕРАМИЧЕСКИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ИЗДЕЛИЯ

Этот вид теплоизоляционных материалов применяют главным образом для устройства тепловой изоляции различного рода промышленных печей и теплопроводов. Температура применения керамических теплоизоляционных изделий зависит от применяемого для их изготовления сырья и находится в пределах 800 ... 1600°С. Немаловажное значение при выборе теплоизоляционного материала имеет коррозионная стойкость в данных условиях службы, а также термическая стойкость изделий, особенно при их применении в тепловых установках периодического действия.

Высокопористое строение керамических теплоизоляционных материалов можно получать различными способами: введением и выжиганием выгорающих добавок, введением высокопористых наполнителей, способами газового вспучивания (газообразованием) и пенообразования; закрепление же полученной высокопористой структуры и придание прочности изделиям во всех случаях достигают только в процессе обжига, что и позволяет объединить все многообразие этих материалов в одну группу керамических изделий.

Перечисленные выше способы получения высокопористой структуры керамических материалов имеют неодинаковую значимость. Некоторые из них применяют широко, а другие ограниченно в силу различных причин или вовсе не используют.

У каждого из этих способов есть свои преимущества и недостатки, и целесообразность применения того или иного способа диктуется видом сырья, технологичностью, требованиями к готовым изделиям, дефицитностью полуфабрикатов и т. п.

Введение в формовочную массу высокопористых компонентов (корундовых полых зерен, вспученных перлита и вермикулита) либо существенно удорожает материал, либо снижает его температуру применения. Химическое вспучивание и вспучивание масс во время обжига применяют крайне редко из-за сложности технологии.

В СССР наибольше распространение получили два способа: способ пенообразования и способ введения и последующего выжигания выгорающих добавок. Последний способ весьма технологичен. Он позволяет точно регулировать среднюю плотность получаемых изделий, не требует введения в формовочную массу большого количества воды, вследствие чего сушку сырца можно производить без форм по ускоренному режиму при существенной экономии топлива.

При выгорании добавок в межпоровых перегородках образуются микротрещины, которые играют роль компенсаторов напряжений, возникающих при цикличном нагревании охлаждении материалов во время их службы в конструкции, в результате чего не-

сколько увеличивается термическая стойкость изделий. Основным недостатком способа выгорающих добавок является ограничение верхнего предела пористости 65%. Это объясняется тем, что традиционные выгорающие добавки (древесные опилки, антрацит и др.) образуют после выгорания поры неправильной формы, создающие в материале при его нагружении высокие напряжения. Поэтому прочность изделий падает при увеличении количества добавок и не обеспечивает заданных механических характеристик материала. Этот недостаток можно исключить, применяя технологию, разработанную в МИСИ им. В. В. Куйбышева, по которой в качестве выгорающей добавки рекомендовано применять мелкие фракции (менее 0,5 мм) пенополистирола, оставляющие после себя сферические поры с гладкой внутренней поверхностью. В этом случае общая пористость материалов может достигать 80...82%.

Применение полистирола в качестве выгорающей добавки создает еще ряд преимуществ по сравнению с традиционными выгорающими добавками. При выгорании он не оставляет после себя золы, что, как правило, сопряжено со снижением огнеупорности материалов; низкая температура полного разложения полистирола (550°С) на диоксид углерода и воду и малая масса облегчают удаление его из обжигаемого материала и делают этот вид выгорающей добавки пригодным для получения всех видов керамических теплоизоляционных материалов; зерна пенополистирола не впитывают воду и не набухают, что в значительной степени облегчает сушку изделий и исключает их коробление. Особенно эффективно применение предвспененных зерен полистирола (способ самоуплотняющихся масс). В этом случае при окончательном вспенивании зерен уложенная в замкнутый перфорированный объем формовочная масса уплотняется, приобретает заданную форму, и механически обезвоживается, что приводит к повышению прочности изделий и резкому снижению затрат теплоты на сушку сырца. Разработано несколько способов подвода теплоты к массе для окончательного вспенивания зерен пенополистирола: тепловлажностная обработка в пропарочных камерах, сушка и электропрогрев (пропускание тока промышленной частоты через увлажненную массу). Для получения керамических теплоизоляционных изделий наиболее эффективен электропрогрев, при котором в течение 30...40 мин завершаются все перечисленные выше процессы (придание изделиям заданной формы, уплотнение стенок пор, механическое обезвоживание формовочной массы до остаточной влажности 30...32%). Досушка распалубленных изделий в этом случае может осуществляться в предпечье за 8...10 ч.

Применение способа самоуплотняющихся масс практически полностью устраняет сушильные усадки или снижает их до минимума (до 0,7...1,2%), что позволяет исключить из технологического процесса механическую обработку обожженных изделий и вследствие этого резко сократить количество отходов.

Таблица 15.1. Основные виды высокопористых керамических изделий и их свойства в зависимости от способа изготовления

Вид изделий	Способ порообразования	Показатели основных свойств				
		$\rho_{ср}$, кг/м³	$R_{сж}$, МПа	λ при 350°С, Вт/(м·°С)	Температура применения, °С	Термостойкость (воздушные теплосмены) от 1000°С
Диатомитовые	Выгорание добавок (опилок)	500 ... 600	0,6 ... 0,7	0,116 ... 0,119	850 ... 900	—
Шамотные (алюмосиликатные)		1000	2,0 ... 2,1	0,49 ... 0,5	1200 ... 1250	8 ... 10
Корундовые		1200 ... 1300	3,0 ... 3,5	1,2 ... 1,3*	1400 ... 1500	6 ... 8
Шамотные (алюмосиликатные)	Выгорание добавок (пенополистирола) способ самоуплотняющихся масс	400 ... 800	1,0 ... 2,0	0,25 ... 0,45	1150 ... 1200	8 ... 10
Корундовые		700 ... 1000	3,5 ... 4,0	0,51 ... 0,8*	1500 ... 1600	6 ... 7
Диатомитовые	Пенообразование	350 ... 450	0,6 ... 0,8	0,087 ... 0,11	850 ... 900	—
Шамотные (алюмосиликатные)		400 ... 800	0,9 ... 2,5	0,15 ... 0,52	1150 ... 1200	6 ... 8
Корундовые		800 ... 1000	0,3 ... 0,35	0,56 ... 0,95*	1500 ... 1600	3 ... 4

* Теплопроводность при средней температуре 600 С.

Этот способ освоен на Подольском заводе огнеупорных изделий и начинает распространяться по другим заводам страны.

Большое практическое значение имеет пеновый способ производства высокопористой керамики. Он позволяет получать изделия с низкой средней плотностью и удовлетворительной прочностью. Однако этот способ имеет ряд серьезных недостатков технологического характера. Он основан на введении в керамический шликер пенообразователей или на смешении шликера с заранее приготовленной пеной. Это обстоятельство связано с возникновением ряда негативных факторов. Во-первых, применение способа пенообразования сопряжено с необходимостью тонкого измельчения исходных материалов с целью предотвращения разрушения пены. При этом чем выше плотность исходного материала, тем выше должна быть его дисперсность. Во-вторых, для обеспечения устойчивой во времени пенокерамической массы требуется введение большого количества воды, что крайне отрицательно сказывается на сушильных свойствах сырца. Процесс сушки характеризуется мягким режимом и большой продолжительностью (иногда более 5 сут). При этом имеют место значительные усадочные деформации, приводящие к короблению сырца и требующие после его обжига обрезки и шлифовки изделий. Все эти негативные факторы предопределяют высокую энергоемкость технологического процесса, образование большого количества (иногда до 50%) отходов, большую продолжительность производственного цикла и его высокую трудоемкость. Поэтому керамические изделия, полученные способом пенообразования, характеризуются высокой себестоимостью.

В табл. 15.1 приведены основные виды высокопористых керамических изделий, выпускающихся отечественной промышленностью и нашедших наиболее широкое применение в промышленной тепловой изоляции. Приведенные в этой таблице данные свидетельствуют о большом влиянии способа создания высокопористой структуры на основные свойства изделий.

По виду применяемого сырья керамические теплоизоляционные материалы подразделяют на диатомитовые (трепельные) и огнеупорные легковесы, которые, в свою очередь, делят на шамотные (алюмосиликатные), дистенсиллиманитовые (высокоглиноземистые), корундовые, циркониевые и другие в зависимости от вида огнеупорного сырья. Средняя плотность получаемых изделий также является критерием, характеризующим их марку.

15.1. Диатомитовые (трепельные) теплоизоляционные изделия

Этот вид керамических изделий применяют для устройства тепловой изоляции теплопроводов и технологического оборудования с температурой поверхности до 850...900°С. Изделия выпускают в виде кирпича, скорлуп и сегментов. Изготовление диатомитовых изделий способом введения и выжигания добавок, в качестве которых использовались древесные опилки, практически прекращено в 1981 г. Причинами этого явились: переориентация древесных опилок в качестве сырья в химическую промышленость (в гидролизное производство) и сравнительно низкое качество изделий, получаемых этим способом. В настоящее время производство этого вида высокопористой керамики осуществляется пеновым способом. По данным ВНИИТеплоизоляции, в 1985 г. было выпущено около 98 тыс. м^3 изделий.

Сырьем для производства пенодиатомитовых изделий служат диатомиты и трепелы — кремнеземистые осадочные породы органогенного происхождения. Диатомиты и трепелы являются разновидностями одной горной породы и имеют одинаковый химический состав. Это природные гидраты кремнезема в аморфном состоянии, относящиеся к группе опала. Их химический состав в чистом виде можно выразить формулой $SiO_2 \cdot nH_2O$. Эти породы различают по своему строению. Трепел — порода более раннего происхождения и более плотная. Диатомиты и трепелы содержат 80...90% SiO_2, 5...10% Al_2O_3 и 2...3% $CaO+MgO$. Трепелы и особенно диатомиты в природном состоянии характеризуются высокой пористостью, достигающей 80...85%; пористость эта мелкая и равномерно распределенная. Эти породы фитогенного происхождения. Исходным веществом при их образовании послужили кремнеземистые панцири микроорганизмов — диатомей. Отсюда и название породы — диатомит. Считается, что трепелы образовались также из диатомий, но в результате длительного процесса разрушения их микроструктуры они более плотные и больше загрязнены различными примесями. Высокая естественная пористость диатомитов и трепелов предопределяет их большое водопоглощение, достигающее 150% по массе. Пластичность этих пород зависит от содержания в них примесей, в основном Al_2O_3. Чистые породы малопластичны, поэтому для улучшения формовочных свойств в них вводят небольшое количество глинистых веществ.

В Советском Союзе имеются значительные запасы диатомитов и трепелов. Наиболее крупные месторождения диатомитов расположены в Ульяновской области (Инзенское) и в Закавказье. Трепелы представлены значительно шире. Их залежи имеются в Московской, Орловской, Калужской областях, на Урале, Дальнем Востоке и Украине.

Технология пенодиатомитовых изделий включает четыре основных технологических операции: подготовку сырья; приготовление пенодиатомитовой массы и формование из нее изделий путем заливки в формы; стабилизацию пористой структуры изделий посредством сушки и образование пористого керамического черепка обжигом высушенного сырца.

На технологической схеме представлена последовательность технологических операций с указанием основного технологического оборудования, применяемого при изготовлении пенодиатомитовых изделий.

Подготовку диатомита осуществляют путем выделения из него каменистых включений, высушивания и помола с целью предотвращения возможного разрушения технической пены в случае наличия в сырье комков диатомита и мелких камней.

Для приготовления технической пены используют природные и синтетические пенообразователи. Приготавливают пенодиатомито-

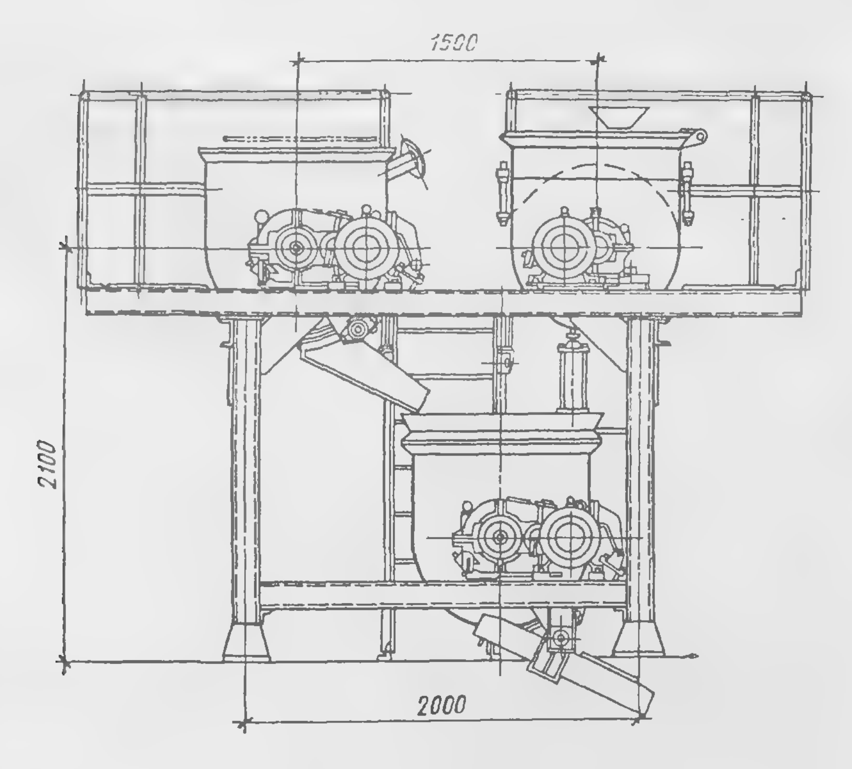
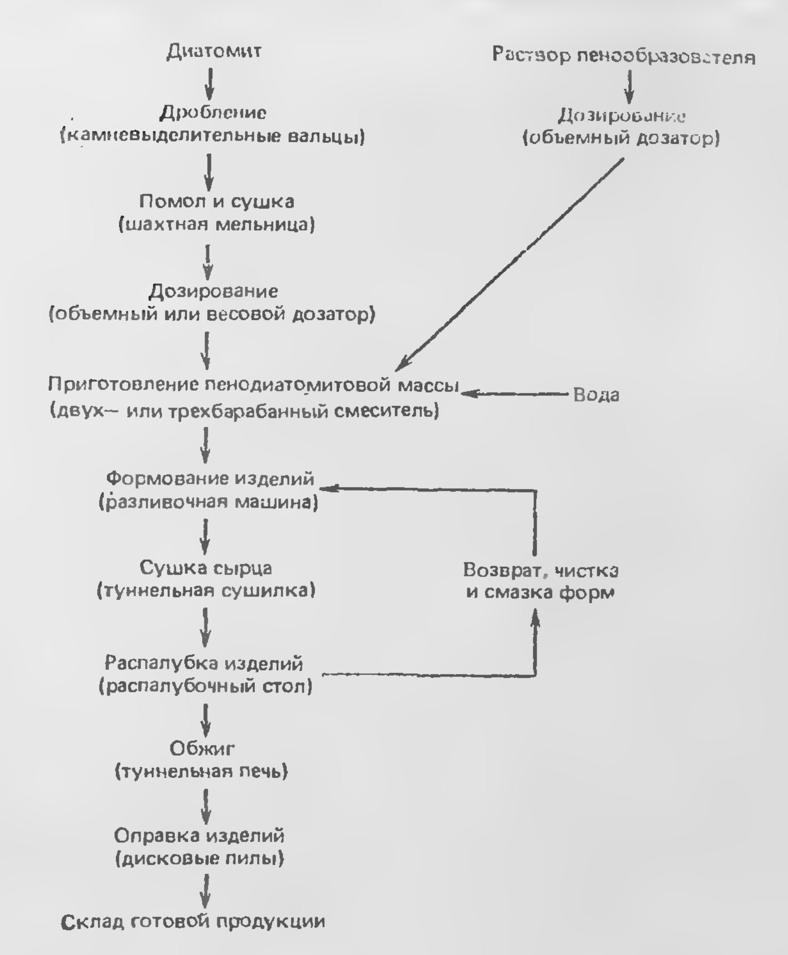


Рис. 15.1. Трехбарабанный пенобетоносмеситель

вую массу, как правило, путем смешивания заранее полученных диатомитового шликера и технической пены в двух- или трехбарабанных мешалках (рис. 15.1). Соотношение шликера и пены зависит от заданной средней плотности изделий. Чтобы получить однородную и устойчивую во времени пенодиатомитовую массу, необходимо приготовить шликер с определенными плотностью (около 1,3 г/см³), консистенцией (погружение стандартного конуса 10...12 см) и температурой (около 25°С). Средняя плотность технической пены должна находиться в пределах 50...65 кг/м³. Процесс смешивания диатомитового шликера и пены осуществляется, как правило, в течение 2,5...3,5 мин в зависимости от емкости смесителя и объема приготавливаемой пеномассы.

Формуют изделия путем заливки пенодиатомитовой массы в стальные или алюминиевые формы соответствующей конфигурации



и размеров. При этом пользуются разливочной машиной, снабженной несколькими разливочными рукавами (желобами), под которые на конвейере подаются очищенные и смазанные формы.

Очень высокая влажность пеномассы, достигающая 200...250%, является причиной больших усадочных деформаций при сушке (20...25%), поэтому при определении размеров форм учитывают усадку изделий при сушке и обжиге.

Сушка пенодиатомитовых изделий производится в формах, что предопределяет неблагоприятные условия для удаления влаги, так как ее испарение может происходить только с верхней поверхности. Это обстоятельство, а также значительные сушильные усадки пеномассы определяют большую продолжительность процесса сушки сырца. Для некоторого снижения усадочных деформаций и повышения влагопроводности пеномассы в шликер при его приготовле-

нии добавляют до 3% опилок, но даже при этих условиях сушка кирпича продолжается 48, а скорлуп и сегментов — 75 ... 96 ч. При этом применяют весьма мягкий режим, особенно в начале процесса (температура теплоносителя не превышает 50°С).

Обжигают изделия в туннельных печах при максимальной температуре 800 ... 900°С в течение 18 ... 22 ч. Химически чистый диатомит, состоящий только из гидрата кремнезема, представляет собой тугоплавкий материал с температурой плавления около 1700°С. Однако диатомиты и трепелы всегда загрязнены легкоплавкими глинистыми и другими примесями, поэтому их спекание происходит при более низких температурах (800 ... 900°С).

Пенодиатомитовые изделия характеризуются относительно невысокой прочностью, поэтому после оправки их следует упаковывать в картонную или деревянную тару.

15.2. Высокопористая огнеупорная керамика

В данном разделе учебника рассмотрены наиболее широко применяемые на практике технологические приемы получения высокопористых огнеупорных изделий, характерные особенности их производства, перспективные возможности совершенствования производственных процессов с целью снижения их энергоемкости, экономии дефицитного сырья, снижения трудозатрат и повышения качества изделий.

Из всего многообразия высокопористой огнеупорной керамики выбраны два вида: алюмосиликатные (шамотные) изделия и изделия из чистых высокоогнеупорных оксидов (корунда), наиболее широко применяемые в промышленности, на примере которых можно проиллюстрировать особенности технологических процессов изготовления теплоизоляционных огнеупорных изделий.

Высокопористые огнеупорные изделия широко применяют в двух главных направлениях. Первое — *тепловая изоляция* и *тепловая защита*. В этом случае эффективность высокопористых огнеупоров определяется главным образом двумя показателями: теплопроводностью и средней плотностью, т. е. показателем эффективности принято считать произведение $\lambda\rho_{ср}$.

Второе направление связано с *использованием развитой поверхности высокопористых огнеупоров*. В этом случае решающими показателями являются общая пористость, ее характер, газопроницаемость и другие показатели пористой структуры. Здесь огнеупорные высокопористые материалы применяют в виде горячих фильтров, газораспределителей, катализаторов в высокотемпературных технологических процессах.

Теплоизоляционные огнеупорные материалы используют главным образом для устройства тепловой изоляции промышленных печей, теплопроводов и другого термического оборудования. Более 50% всех выпускаемых изделий применяют в черной металлургии,

20% — в машиностроении, остальной объем — в промышленности строительных материалов, химической промышленности и других отраслях. Для тепловой изоляции промышленных печей наиболее широко используют шамотные изделия, а при более высоких температурах (выше 1450°С) — корундовые.

Шамотные теплоизоляционные огнеупорные изделия. Их относят к группе алюмосиликатных огнеупоров, которые в зависимости от содержания в них оксида алюминия подразделяют на следующие виды: полукислые (содержание Al_2O_3 до 28%), шамотные (28 ... 45%) и высокоглиноземистые (свыше 45%).

Таким образом, основное различие материалов этой группы заключается в соотношении оксидов Al_2O_3 и SiO_2, преобладающих в их составе. Остальные оксиды — Fe_2O_3, TiO_2, CaO, MgO, R_2O — это примеси, содержание которых в огнеупорных глинах не превышает 4 ... 7% в пересчете на прокаленное вещество. Сырьем для производства алюмосиликатных изделий служат природные огнеупорные глины или их смеси с добавками, содержащими недостающие оксиды.

Глины основных месторождений СССР подразделяют на три минералогических типа: каолиновые, гидрослюдистые и монтмориллонитовые. В технологии теплоизоляционных огнеупорных материалов используют в основном каолиновые глины. Эти глины содержат 25 ... 37% Al_2O_3 и 45 ... 60% SiO_2. Такое сырье пригодно только для производства полукислых или шамотных огнеупоров, так как содержание оксида алюминия (наиболее тугоплавкого компонента) даже в обогащенном просяновском каолине не превышает 39%, т. е. меньше того предела, который необходим для получения высокоглиноземистых изделий.

Для изготовления наиболее широко применяющихся шамотных изделий, как правило, используют природное сырье без подшихтовки добавками с большим содержанием Al_2O_3 (бокситов, технического глинозема и т. п.).

Шамот — обожженная до спекания огнеупорная глина, подвергнутая затем измельчению до определенной заданной дисперсности. Шамот является отощителем, снижающим сушильные и обжиговые усадки керамической массы. Содержание шамота в шихте и тонкость его измельчения зависят от способа изготовления и заданных свойств высокопористых изделий. Таким образом, шамотными называют изделия, получаемые путем обжига сырца, изготовленного из огнеупорных глин или каолинов, отощенных шамотом, полученным из тех же или близких по химическому составу глин.

Шамотные теплоизоляционные изделия по огнеупорности, зависящей в основном от содержания в сырье оксида алюминия, делят на четыре класса:

Класс	0	А	Б	В
Огнеупорность, °С	1750	1730	1670	1580
Содержание Al_2O_3	40 ... 45	38 ... 42	32 ... 38	30 ... 31

Таблица 15.2. Физико-технические свойства шамотных теплоизоляционных изделий

Тип изделия, марка	$R_{сж}$, МПа	λ при 350 °С, Вт/(м·°С)	Дополнительная усадка при 1350°С, %	Температура начала деформации, °С	Термостойкость, водяные теплосмены
Ультралегковес ШЛБ-0,4*	0,8 ... 1,2	0,149	—	1100	—
Пенолегковес ШЛБ-0,6	1,2 ... 1,5	0,22	0,5	[illegible]	4**/8[illegible]
ШЛБ-0,8	2 ... 2,5	0,345	0,5	[illegible]	2 ... 3/850
Пеношамот ШП-1,0	2 ... [illegible]	[illegible]	0,1 ... 0,5		10 ... 13/1300

* Марка шамотных легковесов: Ш — шамотный; Л — легковес; 0,4 и т. д. — средняя плотность, г/см³;

** Над чертой — количество теплосмен, под чертой — температура нагрева образцов, °С.

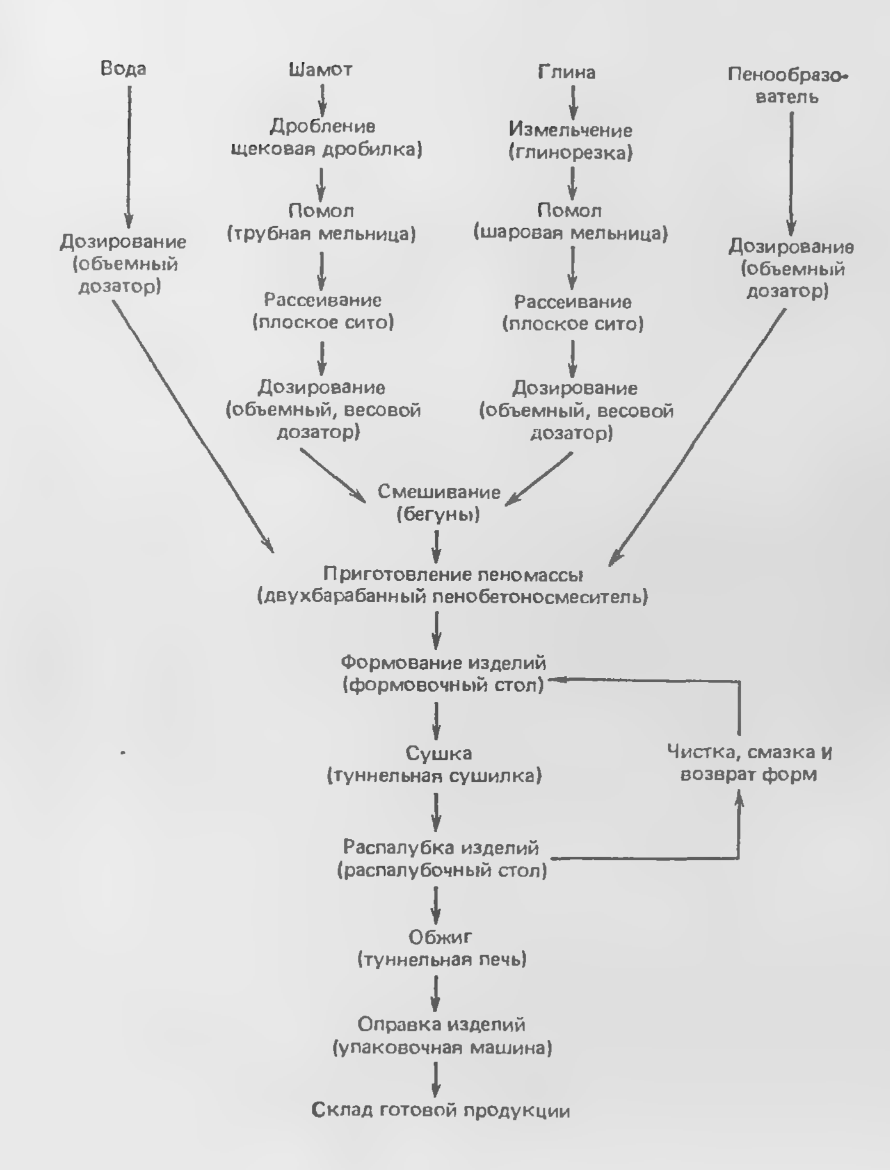
В мировой практике шамотные высокопористые изделия изготовляют, применяя практически все известные способы порообразования. В СССР эти изделия производят способами введения и выжигания выгорающих добавок, пенообразования и введения в состав шихты пористых гранул, получаемых путем дробления обожженных пеношамотных масс (обычно брака, образующегося при производстве пеношамотных изделий). Основные физико-технические свойства шамотных теплоизоляционных изделий приведены в табл. 15.2.

Производство шамотных изделий способом пенообразования. Основные принципы производства пеношамотных изделий практически те же, что и при производстве пенодиатомитовых изделий. Отличительными особенностями являются процессы, связанные с подготовкой сырьевых материалов, и параметры тепловой обработки изделий.

Тонкость помола компонентов определяется заданной средней плотностью изделий; чем она ниже, тем тоньше должен быть помол шамота и глины.

Это положение можно объяснить следующим образом. При снижении средней плотности изделий необходимо уменьшать долю шамота и глины в пеномассе и увеличивать количество технической пены. С другой стороны, для обеспечения устойчивости пеномассы во времени и образования каркаса из твердых компонентов при сушке необходимо покрыть всю поверхность пузырьков пены определенным слоем твердых компонентов. При снижении их расхода это можно достичь только в случае соответствующего увели-

Технологическая схема производства пеношамотных изделий



чения удельной поверхности шамота и глины. Поэтому, например, при получении изделий марки ШЛБ-0,8 шамот измельчают до удельной поверхности 5500 ... 6000 см²/г, а изделия марки ШЛБ-0,4 можно получить лишь в случае увеличения удельной поверхности шамота до 8000 ... 9000 см²/г.

Следует отметить, что увеличение доли технической пены в пеномассе сопряжено с существенным снижением прочности готовых изделий. Для компенсации падения прочности в составе шихты за счет шамота увеличивают долю глины (табл. 15.3).

Таблица 15.3. Составы шихты шамотных изделий

Марка изделий	Расход материалов, % по массе				
	глина	шамот	перлит	пенообразователь *	влажность пеномассы
ШЛБ-0,8	15 ... 20	85 ... 80	—	1,5 ... 1,7	35 ... 37
ГЛБ-0,4	55 ... 60	33 ... 30	10 ... 12	2,3 ... 2,5	57 ... 62

* Расход пенообразователя берется сверх 100%, считая от массы сухих веществ.

С увеличением содержания глины и воды резко возрастают сушильные и обжиговые усадки, что существенно затрудняет термическую обработку изделий. Особенно сложна сушка, которая осуществляется в формах. Продолжительность сушки резко увеличивается при снижении средней плотности изделий. Например, при получении изделий марки ШЛБ-0,8 продолжительность сушки до остаточной влажности 3 ... 4% составляет 36 ... 38 ч, а для марки ШЛБ-0,4 этот процесс длится 60 ... 72 ч.

Во время сушки наблюдаются коробление изделий и образование трещин. С целью частичного исключения этих негативных явлений ВНИИПИТеплопроект предложил в формовочную массу для получения ультралегковеса марки ШЛБ-0,4 вводить некоторое количество вспученного мелкозернистого перлитового песка. Хотя это и приводит к некоторому снижению огнеупорности (на 50 ... 70°С), однако позволяет создать каркас из твердых компонентов, менее подверженный усадочным деформациям при сушке.

Обжиг изделий производят по режиму, показанному на рис. 15.2.

Анализируя рассмотренную выше технологию пеношамотных изделий, можно сделать вывод, что она не соответствует современным требованиям. Она многодельна, высокоэнергоемка, требует большой затраты ручного труда.

Одним из путей снижения энергоемкости и многодельности технологии пеношамотных изделий следует считать предложения МИСИ им. В. В. Куйбышева, основанные на использовании эффекта воздухововлечения во время приготовления формовочной массы и на применении вибрационной обработки с целью интенсификации воздухововлечения, снижения водосодержания пеномассы за счет тиксотропного эффекта и облегчения диспергирования твердых компонентов. В данном случае применение вибромельницы в качестве основного технологического аппарата, в котором совмещаются процессы помола компонентов смеси, их смешивания и получения пеношамотной массы за счет вибровоздухововлечения, позволяет исключить почти все машины помольного отделения: дезинтегратор, смесительные бегуны, трубную и шаровую мельницы, а также установку для приготовления пеномассы и все это заменить одной технологической машиной — вибромельницей.

Введение в формовочную массу воздухововлекающих и пластифицирующих добавок вместе с водой затворения обеспечивает быстрый помол твердых компонентов и повышение устойчивости пеномассы при пониженном на 15... 17% водосодержании. Продолжительность обработки массы в вибромельнице составляет 5...7 мин, при этом тонкость помола компонентов достигает 7500...8000 см²/г. Наиболее интенсивно процессы протекают при степени загрузки объема вибромельницы мелющими телами в пределах 33...36%, а измельчаемым материалом — 30... 35%, при следующих параметрах вибрации: амплитуда 2,5...2,8 мм, частота 1500...1800 кол/мин.

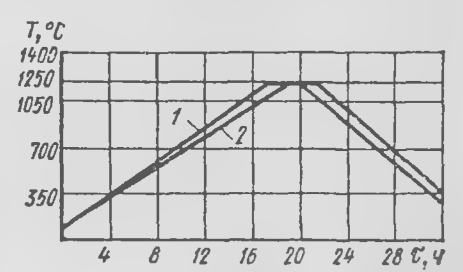


Рис. 15.2. Режим обжига пеношамотных изделий:
1 — ШБЛ-0,8; 2 — ШБЛ-0,4

При таком способе приготовления пеномассы обеспечивается получение изделий со средней плотностью 600 ... 800 кг/м³, т. е. марок ШЛБ-0,6 и ШЛБ-0,8. Сушка сырца в этом случае идет по ускоренному режиму и может быть сокращена на 10 ... 15 ч.

Рассмотренный пример показывает, что не все возможности существующих и широко применяющихся способов порообразования используются и что для достижения наибольшего технико-экономического эффекта необходимо проводить непрерывные и систематические исследования по совершенствованию известных и созданию новых технологических приемов для производства высокопористых материалов вообще и керамических, в частности.

Получение теплоизоляционных шамотных изделий введением в формовочные массы пористых наполнителей. Данная технология основывается на широко известных в производстве строительных материалов принципах — введении в формовочные смеси с целью снижения средней плотности изделий и конструкций легких высокопористых заполнителей искусственного (керамзит, шлаковая пемза, вспученные перлит и вермикулит и др.) или естественного (туфы и т. п.) происхождения. В данном случае для получения огнеупорных теплоизоляционных материалов применяют высокопористые заполнители, огнеупорность которых соответствует заданной огнеупорности готовых изделий. В связи с тем что в природе не встречается высокопори-

стых огнеупорных материалов, их изготовляют искусственным путем.

Именно таким образом получают так называемые пеношамотные (ПШ) изделия. Формовочная масса, предназначенная для их изготовления, содержит 65...70% искусственно изготовленных пористых шамотных гранул размером от 0,5 до 10 мм и 30...35% огнеупорной глины (связующего).

Для снижения средней плотности таких изделий необходимо применять принцип наиболее плотной упаковки пористых гранул, который основывается на использовании гранул с прерывистой гранулометрией, когда соотношение размеров более крупных гранул и более мелких находится в пределах (4...5) : 1.

Пористые шамотные гранулы получают из пеномассы, которую сушат, обжигают, дробят и рассеивают, или используют для этой цели отходы (брак, обрезки), которые образуются при производстве шамотного ультралегковеса (ШЛБ-0,4).

Формуют пеношамотные изделия путем легкого уплотнения или трамбования, сушат, как правило, вне форм по ускоренному режиму, обжиг осуществляют при температуре 1300...1320°С.

К достоинствам этой технологии следует отнести незначительную усадку изделий при сушке и обжиге, что позволяет получать изделия заданных форм и размеров без их механической обработки после обжига; получение изделий с повышенной термической стойкостью, что обеспечивает большую продолжительность их службы по сравнению с изделиями марок ШЛБ. Однако средняя плотность изделий, получаемых этим способом, составляет 1,0 г/см^3 и выше, что объясняется необходимостью введения в формовочные смеси большого количества связующего (огнеупорной глины) для придания сырцу и готовым изделиям необходимой прочности.

Рассмотренные технологические приемы пригодны для получения высокоглиноземистых теплоизоляционных огнеупоров, например дистен-силлиманитовых и некоторых других видов.

Высокопористые теплоизоляционные изделия из чистых огнеупорных оксидов. Огнеупорные изделия, в том числе и теплоизоляционные, получаемые из чистых высокоогнеупорных оксидов (Al_2O_3, BeO, ZnO_2, MgO и др.), характеризуются не только высокой огнеупорностью (более 2000°С), но и обладают целым рядом ценных свойств (химической инертностью, низкой электропроводностью, высокой стойкостью к коррозии и др.). Это позволяет успешно применять их в различных условиях службы. Производство таких высокопористых изделий широко осуществляют лишь способом введения и выжигания органических добавок. При этом стремятся применять добавки с малой зольностью с целью снижения негативного влияния золы на огнеупорность изделий.

Способ пенообразования для производства высокопористых изделий из чистых высокоогнеупорных оксидов малопригоден, так как высокая плотность оксидов требует сверхтонкого их помола для получения устойчивых во времени пеномасс. При этом резко

возрастают затраты электроэнергии на помол, увеличиваются усадочные деформации при термической обработке изделий, возрастает опасность загрязнения материала продуктами намола. Основные недостатки пенового способа присущи и способу газообразования, поэтому основным способом получения таких изделий является в настоящее время способ выгорающих добавок, который также, как будет показано ниже, требует существенного совершенствования.

Наиболее типичным и широко используемым теплоизоляционным материалом, получаемым из чистых оксидов, является высокопористая корундовая керамика, на примере которой рассматривается в данном учебнике технология высокоогнеупорных теплоизоляционных изделий.

Технология высокопористых корундовых изделий и пути ее совершенствования. Корундовая керамика содержит не менее 95% оксида алюминия в виде α-Al_2O_3 — минерала корунда, встречающегося в природе и получаемого искусственным путем. Основным сырьем для получения корундовых изделий служит технический глинозем, содержание оксида алюминия в котором составляет 97...99%. Технический глинозем представляет собой безводный оксид алюминия, известный в нескольких кристаллических модификациях. Самая устойчивая из этих модификаций α-Al_2O_3 (корунд). Известны еще две модификации: γ-Al_2O_3 и β-Al_2O_3. В природе встречается только α-форма; γ-форма образуется при термической обработке природных водных оксидов алюминия, например бокситовых пород.

Искусственно полученная γ-форма неустойчива и при нагревании в интервале температур от 1100 до 1450°С переходит в устойчивую α-форму. При этом происходит существенное уплотнение материала: плотность возрастает с 3,5 до 3,99 г/см^3, а объемная усадка составляет 14,3%. Величина объемной усадки весьма значительна, поэтому она оказывает существенное влияние на технологию изготовления изделий.

Третья — β-форма, по существу, не является чистой модификационной кристаллической формой глинозема, а представляет собой условное обозначение группы алюминатов с высоким содержанием оксида алюминия. В общем виде состав соединений, входящих в эту группу, можно выразить, например, формулами: $MeO \cdot 6Al_2O_3$ и $Me_2O \cdot 12Al_2O_3$, где MeO может быть представлено CaO, BaO, SrO и др., а Me_2O — Na_2O, K_2O, Li_2O и др. Обычно содержание в таких алюминатах щелочных и щелочноземельных оксидов составляет 8...10%. При нагревании до 1600...1700°С β-глинозем разлагается, в результате чего образуется α-Al_2O_3, а сопутствующие оксиды выделяются в газообразном состоянии. Следует отметить, что β-глинозем снижает механическую прочность и электрофизические свойства обожженных корундовых изделий, поэтому его присутствие в корундовом материале и в составе шихты нежелательно.

Искусственно полученный глинозем (сырой глинозем) представляет собой однородный белый порошок с насыпной плотностью 0,85 г/см³. Его зерна состоят из скопления мельчайших кристаллов γ-Al_2O_3, имеют шарообразную форму и пористое строение. Такую структуру называют сферолитной. Сферолиты практически не спекаются, что определяет необходимость их разрушения. С этой целью технический глинозем предварительно обжигают при температуре 1300 ... 1350°С. При этом достигается почти полный перевод γ-Al_2O_3 в устойчивую α-форму и существенное снижение усадок при обжиге изделий.

Вторым видом сырья для корундовой керамики является электрокорунд. Чаще всего, особенно для производства высокопористых изделий, используют белый электрокорунд, который получают плавлением в электродуговых печах технического глинозема и последующим раздувом расплава. При этом образуются зерна корунда размером от нескольких мкм до нескольких десятков мкм. Обычно в белом электроплавленом корунде содержится 98% и более α-Al_2O_3. При получении высокопористой корундовой керамики электрокорунд вводят в состав шихты главным образом для снижения огневых усадок, что создает возможность исключения из технологического цикла калибровки обожженных изделий.

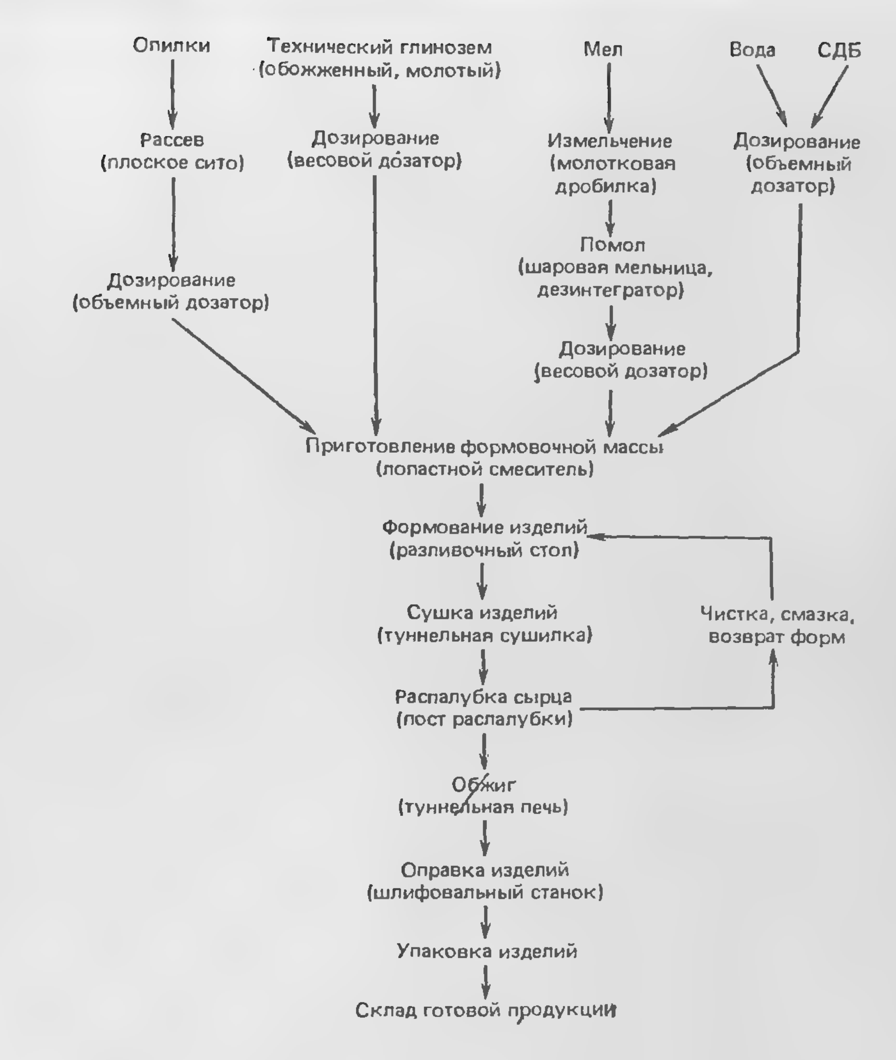
Промышленное производство корундовых высокопористых изделий осуществляют способом литья, а *поризацию* — способом выгорающих добавок (см. схему на стр. 297).

Формовочную массу приготавливают в лопастных смесителях, она представляет собой шликер следующего состава: предварительно обожженный технический глинозем — 95% по массе; мел — 5% (мел вводят для снижения обжиговых усадок); древесные опилки — 25 ... 30% от массы твердых компонентов; влажность массы — 45 ... 50%. Обычно в воду затворения вводят сульфитно-спиртовую барду или другую пластифицирующую добавку.

Формуют изделия литьем в металлические формы. Сушка сырца осуществляется в формах, в противоточных туннельных сушилках в течение 42 ... 48 ч при максимальной температуре 100 ... 110°С. Обжиг изделий осуществляют в туннельных печах по режиму, приведенному на рис. 15.3.

Высушенные изделия в результате усадочных деформаций и удаления влаги лишь с одной (верхней) поверхности имеют неправильную форму и подлежат калибровке, которую производят на специальных станках после обжига изделий. В результате выполнения этой операции образуется значительное количество отходов в виде кусков, порошка и пыли.

Изделия, получаемые по приведенной технологии, характеризуются следующими показателями: средняя плотность — от 1,1 до 1,4 г/см³; прочность при сжатии — от 7 до 10 МПа, огнеупорность — 1830°С, дополнительная усадка при температуре 1500°С — 3,95%, теплопроводность при средней температуре 700°С 0,56 ... 0,89 Вт/(м · °С).



К недостаткам традиционной технологии корундовых теплоизоляционных изделий следует отнести невозможность получения изделий со средней плотностью ниже 1,0 г/см³; высокое содержание воды в формовочной массе, подлежащей удалению испарением, что кроме больших затрат труда приводит к деформации изделий и необходимости их калибровки после обжига; загрязнение материала CaO и снижение в связи с этим его эксплуатационных свойств.

Совершенствование способа выгорающих добавок. Применительно к производству шамотных, дистен-силлимонитовых (разновидности высокоглиноземистых) и корундовых высокопористых изделий совершенствование данного способа должно идти в направлении снижения средней плотности продукции, улучшения ее

эксплуатационных и функциональных свойств, повышения технологичности, снижения энергоемкости и трудоемкости производственного процесса, сокращения объема брака и отходов.

Наглядным примером такого подхода являются новые технологические принципы, разработанные в МИСИ им. В. В. Куйбышева Эти принципы базируются на применении нового эффективного вида выгорающей добавки, позволяющей увеличить общую пористость изделия с 65 до 80 ... 82%, использовании вибрации как фак

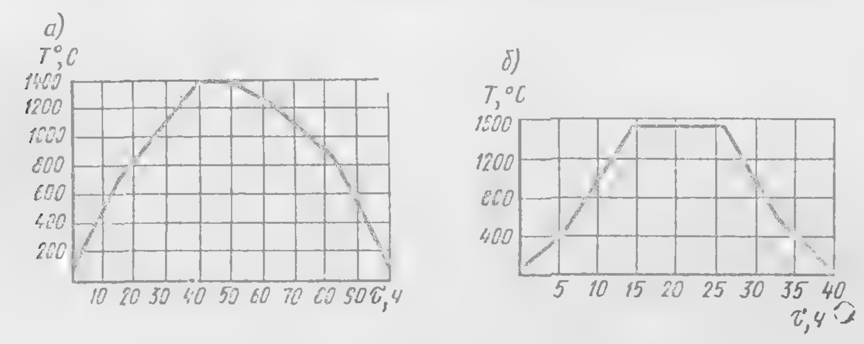


Рис 15.3. Режим обжига корундовых легковесных изделий:

а — выгорающая добавка - опилки; *б* — то же, вспененный отсев полистирола

тора, позволяющего эффективно уплотнять формовочные смеси при формовании изделий, существенно снижать водосодержание масс, а также на совмещении нескольких технологических процессов в одной производственной операции.

Этот подход можно проиллюстрировать двумя конкретными примерами.

Первый пример — технология корундовых высокопористых изделий, основанная на применении беззольной выгорающей добавки шаровидной формы сверхнизкой плотности (0,03 ... 0,04 г/см³) — мелких фракций (менее 0,5 мм) пенополистирола, являющегося отходом производства пенопластов, и вибропрессового способа формования изделий из масс с низкой влажностью.

Технологический процесс производства теплоизоляционных огнеупоров (на примере корундовых изделий) с применением рассматриваемого способа организуется по следующей технологической схеме на стр. 299.

Особенности технологии заключаются в следующем. Приготовление формовочной массы из компонентов с резко отличающейся плотностью (вспененный полистирол и зерна огнеупорного компонента) требует строгого соблюдения технологических параметров. Во-первых, влажность массы должна быть невысокой (21 ... 25% в зависимости от огнеупорного сырья) и обеспечивать комкуемость смеси. Во-вторых, для обеспечения однородности формовочной смеси необходимо соблюдать следующий порядок загрузки компо-



нентов в смеситель: в начале загружают вспененный полистирол, затем раствор СДБ и после 1 ... 1,5-минутного перемешивания — тонкодисперсный порошок огнеупорного компонента. В процессе перемешивания порошок огнеупорного вещества равномерно налипает на смоченные раствором СДБ более крупные зерна пенополистирола, в результате чего через 6 ... 8 мин образуется формовочная смесь с равномерным распределением компонентов.

Формуют изделия на виброплощадке в специальных формах, ячейка которых показана на рис. 15.4. Форма состоит обычно из 15 ... 20 таких ячеек. Размер ячеек определяют с учетом воздушных и обжиговых усадок материала. Форму, заполненную массой, крепят на виброплощадке, сверху на нее накладывают пригруз, выполненный в виде пуансонов, по размерам совпадающих с ячейками формы. Через 5 ... 10 с вибрации систему нагружают; величина нагружения не должна превышать 0,03 МПа во избежание деформации зерен пенополистирола, обладающих упругим последействием. По окончании вибропрессования изделия вместе с поддонами выдавливают из ячеек на специальном приспособлении. Сырец на поддонах сушат, снимают с поддонов и направляют на обжиг. В данном случае сушка осуществляется за 8 ... 10 ч вместо 3 ... 5 сут.

В зависимости от вида огнеупорного компонента этим способом можно получать изделия со средней плотностью от 0,4 (шамотные) до 0,6 ... 0,8 г/см² (высокоглиноземистые и корундовые).

Изделия не требуют механической обработки после обжига, характеризуются ровными четкими гранями и правильной формой. По основным показателям свойств они полностью удовлетворяют требованиям стандартов.

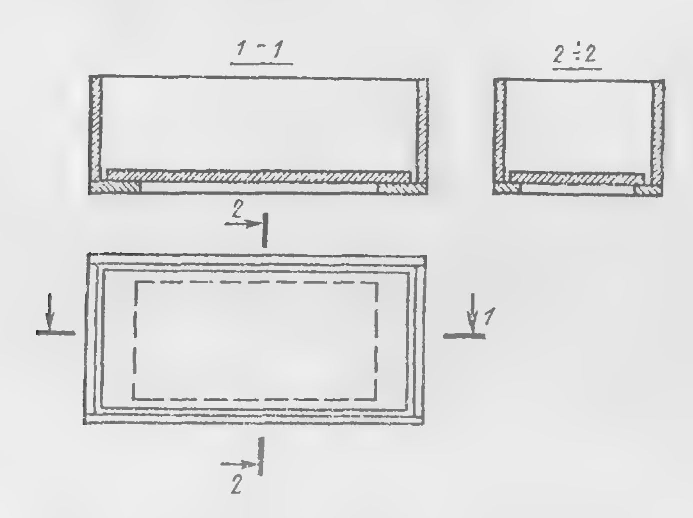


Рис. 15.4. Конструкция ячейки многоячейковой формы для получения корундовых теплоизоляционных изделий с применением пенополистирола

Второй пример — с целью совершенствования приведенной выше технологии разработан способ, предусматривающий самоуплотнение масс за счет вспенивания зерен полистирола непосредственно в формовочной смеси, уложенной в замкнутую перфорированную форму, конфигурация которой соответствует форме изготовляемых изделий. Такой прием позволяет использовать давление, создаваемое вспенивающимися гранулами полистирола (0,04 ... 0,05 МПа), для уплотнения смеси и выштамповывания из нее изделий, т. е. использовать пенополистирол для выполнения полезной работы, а не просто выжигать с целью образования пористости. Давление, развиваемое полистиролом при сушке изделий (температура 100 ... 105°С), позволяет практически полностью исключить сушильные усадки, так как при уплотнении смеси из нее механически отжимается и удаляется через перфорацию форм более 70% воды затворения, т. е. почти вся вода, вызывающая усадочные деформации при сушке. Сам по себе этот факт является большим достижением в технологии керамических изделий. Если же еще учесть и то, что вода удаляется механическим путем, а не испарением, т. е. минуя энергоемкий переход из жидкой в газообразную фазу, то становится очевидным большое практическое значение способа самоуплотняющихся масс.

Особенности технологии в этом случае заключаются в том, что процессы необходимого уплотнения формовочной массы, формования из нее изделий заданной формы и ее обезвоживания совмещаются в одной технологической операции. При этом обеспечиваются нормальные условия труда — исключается любой шум, снижается объем ручного труда.

За счет хорошего и равномерного уплотнения формовочной массы и практически полного отсутствия сушильных усадок изделия, получаемые этим способом, характеризуются более высокой (на 25 ... 30%) механической прочностью по сравнению с требованиями стандартов. Преимуществом этого способа является также его универсальность, т. е. пригодность для любого сырья, применяющегося в технологии керамики и огнеупоров.

В настоящее время способ самоуплотняющихся масс реализован в новой технологии, которая освоена в системе «Союзогнеупор» Министерства черной металлургии СССР.

ГЛАВА 16

ЖАРОСТОЙКИЕ ВОЛОКНА И ПОРИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ИХ ОСНОВЕ

На современном этапе развития научно-технического прогресса основными задачами в промышленном печестроении следует считать повышение производительности труда при производстве тепломонтажных работ, снижение материалоемкости, получение новых эффективных видов материалов и конструкций с более высокими функциональными и строительно-эксплуатационными свойствами. Создание на этой основе тепловых агрегатов, обеспечивающих экономию топливно-энергетических ресурсов, интенсификацию протекающих в них пиропроцессов, снижение материалоемкости строительных конструкций, внедрение индустриальных методов монтажа при сооружении, реконструкции и ремонте промышленных печей — вот основная задача, требующая скорейшего решения.

Как показывает мировой и отечественный опыт, применение в промышленном печестроении жаростойких волокон и изделий на их основе позволяет получать весьма существенный технико-экономический эффект.

Применение этих материалов обеспечивает снижение материалоемкости огнеупорной футеровки в 7 ... 11 раз и соответственно в 6 ... 9 раз уменьшение ее теплоемкости, что имеет очень большое значение для интенсификации происходящих в печах или других тепловых агрегатах пиропроцессов и экономии технологического топлива, особенно в тепловых установках периодического действия.

Практика показывает, что время и трудовые затраты на монтаж футеровки из волокнистых жаростойких материалов и изделий составляют примерно 10% времени и трудовых затрат, необходимых на устройство футеровки при использовании традиционных материалов. Если учесть, что теплопроводность волокнистых материалов при температуре 1000°С примерно в 2 раза ниже, чем традиционных ячеистых материалов, а термическая стойкость, определяющая продолжительность службы материала в конструкции, в несколько раз выше, то становится понятным большой интерес к этому виду жаростойких теплоизоляционных материалов со стороны многих отраслей промышленности, в которых пиропроцессы являются основным технологическим приемом получения продуктов: черной и цветной металлургии, химической и нефтеперерабатывающей промышленности, промышленности строительных материалов и др.

16.1. Способы получения жаростойких волокон

Свойства жаростойких волокон в значительной степени определяются их структурой, которая зависит от вида применяемого сырья и технологии получения волокна. Для промышленных целей в основном используют волокна стекловидной структуры и значительно реже — поликристаллические волокна. Это объясняется высокой стоимостью последних из-за сложности их изготовления.

Основными методами получения поликристаллических волокон являются следующие.

Испарение коллоидных суспензий предусматривает получение волокна путем испарения коллоидных суспензий, содержащих оксид или оксиды, которые должны образовать поликристаллические волокна. По мере испарения суспензии, распределенной тонким слоем на подложке, пленка обезвоживается, растрескивается вдоль цепочек наполнителя, мельчайшие зерна (кристаллы) которого по мере повышения температуры до определенного уровня спекаются, образуя волокна неправильного поперечного сечения с размерами: ширина — до 0,3 см, отношение ширины к толщине — от 3 : 1 до 10 : 1 при длине 0,5 ... 5 см.

Экструзионная технология заключается в продавливании вязкой смеси тонкомолотого огнеупорного оксида с органическим связующим через платиновые фильеры и последующем обжиге до спекания тонкодисперсных частиц оксида. Получаются жесткие, умеренно прочные волокна диаметром 0,1 ... 0,2 мм. Во время обжига необходим точный контроль температуры для предотвращения нежелательного роста кристаллов.

Прядильная технология аналогична технологии текстильных органических волокон и технологии текстильного стеклянного волокна. Отличие заключается в том, что вытягиваемые из вязкой массы волокна содержат наполнитель — тонкодисперсный порошок

оксида, который становится единственным компонентом волокна после его термической обработки. В промышленных масштабах освоен выпуск волокон из α-Al_2O_3 и SiO_2. Обжигают волокна при температуре до 1550°С; получают поликристаллические волокна диаметром около 25 мкм.

Пропиточная технология заключается в пропитке органических волокон растворами солей алюминия или циркония и последующей термической обработке до температур, соответствующих образованию оксидов.

Существует еще ряд разновидностей способов получения поликристаллических волокон, но все они, как и рассмотренные выше, многодельны, энергоемки, поэтому стоимость поликристаллических волокон пока слишком высока и на данном этапе их широкое промышленное применение в качестве теплоизоляции весьма проблематично. Однако следует отметить, что перспективность работ по созданию эффективных способов получения поликристаллических жаростойких волокон очевидна, чем объясняется проведение широких исследований в этом направлении как у нас в стране, так и за рубежом.

Волокна стекловидной структуры получают следующими основными способами: вытягиванием нити из штабика (штабиковый способ); переработкой расплава в волокно с последующей химической и термической обработкой волокон; переработкой расплава с получением готового к использованию волокна.

Штабиковый способ применяют в основном для получения текстильных кварцевых волокон. Этим же способом получают в небольших количествах кварцевые волокна в виде ваты. Этот способ из-за низкой производительности (2 ... 6 кг волокна в час) непригоден для получения теплоизоляционного волокна в широких масштабах.

Технология с последующей *химической и термической обработкой* волокна предусматривает получение расплава SiO_2 с добавкой 25% щелочных оксидов (в основном Na_2O). Расплав такого состава легко перерабатывается в вату способом раздува. Полученную вату подвергают кислотной обработке для выщелачивания, а затем — термической для дегидратации. В результате волокна усаживаются по толщине и длине, существенно снижают прочность и эластичность, но приобретают повышенную огнеупорность. В промышленном масштабе эту технологию применяют для получения волокон, содержащих 98 ... 99% SiO_2.

Переработка расплава в готовое волокно наиболее перспективна. Эта технология получила наиболее широкое распространение для массового производства жаростойких волокон, применяемых в качестве основного компонента для устройства тепловой изоляции промышленных печей и других высокотемпературных аппаратов и теплопроводов. Технология жаростойких волокон не имеет принципиальных отличий от технологии минеральной ваты. Для получения жаростойких волокон в качестве плавильного агрегата

применяют электродуговые печи, позволяющие плавить любое силикатное сырье и поддерживать заданную температуру расплава.

Подбор составов шихт для получения жаростойкой ваты со стекловидной структурой основывается на следующих основных положениях.

Поскольку волокна, получаемые из расплава, находятся в стеклообразном состоянии, их устойчивость при воздействии высоких температур определяется двумя факторами: устойчивостью против рекристаллизации, которая приводит к существенной потере прочности или к полному разрушению волокон, и термической устойчивостью или температурой спекания, которая соответствует появлению жидкой фазы.

Устойчивость волокна против рекристаллизации связана с наличием в стекле оксидов-стеклообразователей. Эта зависимость подчиняется общей закономерности — чем выше содержание стеклообразователя в системе, тем выше склонность системы к стеклообразованию. Кристаллизационная способность каждой отдельной системы должна рассматриваться с учетом ее диаграммы состояния. Существует общая зависимость склонности различных систем к стеклообразованию от скорости их охлаждения. Чем меньше в системе содержание стеклообразователя, тем выше должна быть скорость охлаждения.

Математический критерий склонности оксидов к стеклообразованию был выведен Гарино-Канным, он имеет следующий вид:

$$A = z^2 \left(\frac{V_v}{V_c} \right) 4/3,$$

где z — валентность; V_v и V_c — соответственно суммарный объем пустот и катионов в единице массы или объема.

Оксиды, имеющие критерий A выше 1000, [illegible]ются типичными стеклообразователями. Во всех случаях, когда [illegible] имеет критерий A от 100 до 1000, для получения стекла требуется специальная техника скоростного охлаждения расплава, а на основе оксидов с критерием A менее 100 вообще нельзя получить стекла из-за высокой кристаллизационной способности таких оксидов. Из шести оксидов с критерием A выше 1000 в качестве стеклообразователей практически можно применять только два: B_2O_3 и SiO_2, поскольку остальные диссоциируют до образования расплава. B_2O_3 имеет очень низкую температуру плавления (450 С), поэтому непригоден для получения жаростойких композиций. Следовательно, для получения жаростойких волокон стеклообразной структуры может быть применен в качестве стеклообразователя диоксид кремния. Как показывает практика, для проведения процесса стеклообразования и получения стабильных стекол содержание стеклообразователя в системах должно быть не менее 20...30%.

При выборе составов для получения жаростойких термически устойчивых волокон предпочтение следует отдавать системам с возможно меньшим числом компонентов, поскольку по правилу Рауля — Вант-Гоффа при приближении к любому [illegible]

[illegible] температуры.

Однако использовать для получения жаростойкого волокна только диоксид кремния весьма затруднительно из-за высокой температуры его плавления и высокой вязкости. Повышение температуры (перегрев) с целью снижения вязкости расплава приводит к интенсивному выгоранию SiO_2 при взаимодействии с угольными электродами:

$$2SiO_2 + 3C \rightarrow SiO \nearrow + 3CO \nearrow + Si$$

Для снижения температуры плавления без значительного уменьшения температуростойкости волокон применяют, как правило, двухкомпонентную систему, содержащую в качестве стеклообразователя диоксид кремния и один из огнеупорных оксидов: Al_2O_3, MgO, CaO и др. Решение о пригодности каждой отдельной двухкомпонентной системы для получения жаростойкого волокна может быть принято на основе анализа соответствующей диаграммы состояния. При этом следует оговорить, что диаграммы состояния соответствуют кристаллическому состоянию вещества, и связь кривых, представленных на диаграммах, со стекловидным состоянием вещества не является однозначной, а зависит от скорости охлаждения или нагревания. Следовательно, по диаграмме состояния можно судить только об области температур стеклования и трансформации, а не о конкретной цифре, зафиксированной линией солидуса. Температура солидуса — это температура появления жидкой фазы, в то время как при температуре ликвидуса количество жидкой фазы достигает всего лишь нескольких процентов своей прочности из-за появления жидкой фазы, то волокно толщиной от одного до нескольких микрометров уже в начале появления жидкой фазы спекается с другими волокнами. Таким образом, из-за различия в толщине температура солидуса является определяющей для термической устойчивости волокна. Кроме того, по диаграмме состояния можно определить составы, соответствующие минимуму кристаллизационной способности системы, поскольку минимум этого показателя характерен для тех составов, в которых в качестве первых фаз выделяются одновременно два или более видов кристаллических соединений (эвтектические точки, границы полей на диаграммах состояния). Эвтектические составы должны обладать преимуществами при выборе состава композиций для получения жаростойких волокон еще и потому, что имеют минимальную температуру плавления при равной для области данной эвтектики температуростойкости волокна.

Потеря прочности при рекристаллизации зависит не только от вещественного состава волокна, но и от его диаметра. В толстом

волокне (более 10 мкм) внутренние напряжения, приводящие к разрушению волокна в процессе кристаллизации, гораздо больше, чем в тонком (1 ... 5 мкм). В частности, установлено, что если толстое волокно в процессе кристаллизации теряет 90 ... 100% прочности, то тонкое волокно того же состава, за тот же период всего 70 ... 75%. Кроме того, начальная прочность тонкого волокна значительно выше (из-за меньшего количества микродефектов). Отсюда следует, что жаростойкие волокна должны иметь диаметр не более 5 мкм.

В мировой практике для промышленной тепловой изоляции наиболее широко применяют алюмосиликатные волокна, получаемые методом раздува расплава. К таким волокнам относят «Каовул», «Файберфракс» (США), «Тритон каовул» (Англия), «I-27» (Япония), «Резистекс» (ЧССР), муллитокремнеземистое волокно «МКРВ» (СССР). Основные свойства и химический состав этих волокон приведены в табл. 16.1.

Таблица 16.1. Основные свойства и химический состав жаростойких алюмосиликатных волокон

Показатели свойств	Вид волокна				
	«Тритон-каовул»	«Файбер-фракс»	«I—27»	«Резис-текс»	«МКРВ»
Длина, мм	125 ... 250	15 ... 45	100 ... 250	30 ... 70	30 ... 100
Диаметр, мкм	2,8	До 10	2,8	2,5	3 ... 4
Плотность, г/см³	2,6	2,73	2,56	2,56	2,7
Средняя плотность ваты, кг/м³	48 ... 160	64 ... 96	80 ... 140	60 ... 90	80 ... 200
Температура применения, °C	До $\frac{1260}{1150}$	1260	1260	До 1300	До $\frac{1260^{*}}{1150}$
Огнеупорность, °C	1750	1760	1760	—	1750
Химический состав, %:					
Al_2O_3	45,1	51,2	45,1	42 ... 48	48,9
SiO_2	51,9	47,4	51,9	48 ... 55	50,3
TiO_2	1,7	—	1,7	0,5 ... 4,0	Следы
Fe_2O_3	1,3	—	1,3	0,2 ... 2,0	0,13
MgO	Следы	—	Следы	0,2 ... 1,0	Следы
CaO	0,1	—	0,11	0,1 ... 1,0	0,14
ZrO_2	—	—	—	—	—
Na_2O	0,2	0,7	0,2	0,1 ... 1,5	0,04
B_2O_3	0,08	0,7	—	—	—

* Над чертой — температура кратковременного применения; под чертой — длительного применения.

Как показала практика, специфические особенности алюмосиликатных расплавов, содержащих SiO_2 и Al_2O_3 в соотношении примерно 1 : 1, создают определенные трудности образования волокон. Процесс волокнообразования протекает в довольно узком температурном интервале при высоких температурах и низких значениях начальной вязкости расплава: начальная температура формирова- [illegible]

В настоящее время во многих странах интенсивно ведутся исследования с целью получения новых видов волокон с более высокой температурой применения.

Исследования процесса получения волокон со стекловидной структурой показали, что при использовании чистых тугоплавких оксидов и их соединений могут быть получены длинноволокнистые структуры только из SiO_2 или на основе бинарных систем, состоящих из SiO_2 и таких оксидов, как Al_2O_3, ZrO_2, HfO_2, CeO_2, TiO_2. Наибольшей термостабильностью (2000°C) обладают волокна из силикатов гафния и циркония.

Волокна из чистых оксидов ZrO_2, Al_2O_3, BeO, TiO_2, MgO могут быть получены только в виде нитевидных кристаллов («усов») или поликристаллической структуры. Выявлено также, что модифицирование бинарных силикатных систем третьими веществами и применение трехкомпонентных систем, состоящих из диоксида кремния и двух тугоплавких оксидов, в большинстве случаев не дают преимуществ по термостабильности в сравнении с алюмосиликатным волокном. Тем не менее проведенные в СССР исследования выявили возможность получения стекловидных волокон с повышенной термостабильностью в случае применения алюмосиликатной системы, модифицированной оксидом хрома. В этом случае соотношение между Al_2O_3 и SiO_2 должно быть равным 0,7 : 0,9, их общее содержание в системе — не менее 93%, при наличии примесей не более 1% и содержание Cr_2O_3 не должно превышать 4%. Температура применения такого волокна повышается до 1300°C, что весьма существенно расширяет области применения волокнистых жаростойких материалов. Однако следует отметить, что хромосодержащая вата характеризуется повышенной средней плотностью и большим содержанием неволокнистых включений. Производство хромсодержащей ваты может быть организовано без каких-либо серьезных доработок на том же оборудовании, на котором осуществляется выпуск муллитокремнеземистого волокна.

Как уже отмечалось, для жаростойких волокон, нашедших широкое применение на практике, характерна стекловидная структура. Известно, что вещество в стекловидном (аморфном) состоянии метастабильно и обладает потенциальной энергией, которая при определенных условиях может проявляться. Например, при длительном воздействии высоких температур в стекловидных материалах начинается кристаллизация, приводящая к потере прочности или разрушению этого материала. Иногда этот процесс и происходит в жаростойких стекловидных волокнах при их эксплуатации. Интенсификация процесса рекристаллизации связана с достижением материалом критической температуры, которая, как правило, на 450 ... 500°C ниже температуры плавления. Это обстоятельство

делает весьма затруднительной задачу получения жаростойких стекловидных волокон, пригодных для применения при температурах выше 1400°С. Поэтому в последние годы стали большее внимание уделять совершенствованию технологии поликристаллических волокон из различных тугоплавких оксидов и их смесей.

В этом плане большой интерес представляет так называемая пропиточная технология, основанная на пропитке органических волокон солями тугоплавких оксидов, например солями алюминия или циркония с последующей термической обработкой, а также применение прядильных высоковязких растворов из солей оксидов с применением полимерных загустителей. В Украинском научно-исследовательском институте огнеупоров разработаны составы и методика приготовления прядильных растворов, способы формования и фиксирования нитей, режимы термообработки, позволяющие получать высокоогнеупорные поликристаллические волокна из оксида алюминия. Исходными компонентами для приготовления вязких растворов служат хлористый алюминий и ацетат алюминия. Формирование волокон осуществляется центробежно-фильерно-дутьевым способом, заключающимся в том, что прядильный раствор вязкостью не менее 2,5 Па·с экструдируется под действием центробежных сил через тонкие фильеры в виде тонких струек, которые дополнительно подвергаются воздействию направленного потока горячих газов (воздуха). Термическая обработка, связанная со сложными физико-химическими процессами формирования оксидных волокон, проводится ступенчато до 800 и 1100°С с выдержкой по 5...8 ч. Для регулирования структурообразования вводят добавки, замедляющие рост кристаллов.

В Великобритании, США, Франции и некоторых других странах начато широкое производство волокон «Сеффил». Это поликристаллические волокна, состоящие из оксидов циркония или оксида алюминия с небольшими добавками редкоземельных или некоторых неорганических оксидов для стабилизации кристаллической структуры. Основные показатели этих волокон приведены в табл. 16.2.

Волокна «Сеффил» характеризуются равномерным диаметром, отсутствием неволокнистых включений, хорошей упругой восстанавливаемостью, химической устойчивостью и устойчивостью к вибрации. Эти свойства волокон предопределили их широкое применение в качестве теплоизоляционного материала в технике высоких температур. Следует также отметить, что наиболее термически устойчивыми и химически стойкими волокнами из всех известных в настоящее время являются именно поликристаллические волокна на основе Al_2O_3 и ZrO_2.

Не менее важным является вопрос создания дешевых волокон из недефицитного сырья с рабочей температурой 900...1000°С, которую применяют в электроэнергетике, промышленности строительных материалов, в различного рода отжиговых и методических печах в машиностроении, цветной металлургии и других отраслях промышленности. Анализ химического и минералогического состава зол тепловых электростанций свидетельствует о возможности их использования в качестве сырья для получения жаростойких волокон. Исследования, проведенные в МИСИ им. В. В. Куйбышева в этом направлении, подтвердили эту возможность. Золы Экибастузского, Подмосковного и некоторых других угольных бассейнов содержат в своем составе до 41...50% SiO_2, до 35...41% Al_2O_3, 3,5...4% CaO, 4...5% MgO и 0,5...1,5% Fe_2O_3, считая на прокаленное вещество. Проведенные исследования позволили выявить, что различное, в том числе высокое, содержание несгоревшего топлива особого влияния ни на процесс плавления золы, ни на качество получаемой ваты не оказывает. В результате была получена жаростойкая золовата методом эжекционного раздува расплава, характеризующаяся следующими показателями свойств: длина волокон — 100...200 мм, диаметр — 3...8 мкм, плотность волокна — 2,7 г/см³, средняя плотность ваты — 75...90 кг/м³, температура применения — 970°С, температура плавления — 1630°С.

Таблица 16.2. Основные физико-технические свойства поликристаллических волокон Сеффил

Показатели свойств	Волокна из оксида	
	циркония	алюминия
Плотность, г/см³	5,6	2,8
Температура плавления, °С	2500	2000
Максимальная температура применения, °С	1600	1400
Средний диаметр волокон, мкм	2...3	2...3
Содержание оксидов, % по массе:		
Al_2O_3	—	95
SiO_2	—	5
ZrO_2	92	—
V_2O_3	8	—

Используя в качестве связующего огнеупорные глины, на основе золоваты можно получать теплоизоляционные изделия для устройства тепловой изоляции при рабочих температурах 1000...1100°С.

Зарубежные фирмы, производящие алюмосиликатные волокна, применяют центробежный или горизонтально-дутьевой способы переработки расплава в волокно с последующей очисткой получаемой ваты от «корольков», доля которых составляет 60...70% по массе. В Советском Союзе применяют эжекционный способ, основанный на использовании эжекционных сил кольцевого потока энергоносителя, движущегося с высокой скоростью параллельно продольной оси сопла. В этом случае струя расплава под действием эжекционных сил энергоносителя засасывается в приемное отверстие волокнообразующего устройства и превращается в волокно. Этот способ позволяет практически исключить засорение ваты неволокнистыми включениями размером более 0,25 мм.

П р о и з в о д с т в о м у л л и т о к р е м н е з е м и с т о г о в о л о к н а организовано следующим образом. Сырьевые материалы, в качестве которых применяют технический глинозем с содержанием Al_2O_3 99% и кварцевый концентрат (содержание SiO_2 не менее 97,5%), после весовой дозировки смешивают с увлажнением в роторном смесителе и загружают в электродуговую печь; полученное в результате переработки расплава волокно осаждается в камере волокнообразования на сетчатую ленту транспортера и образует волокнистый ковер, который ножами поперечной резки разрезается на необходимые по длине заготовки. Упакованные в виде рулонов заготовки отправляются на склад готовой продукции или поступают на переработку в изделия.

Главным технологическим аппаратом является электродуговая печь, определяющая производительность линии. Применяют печи с вместимостью ванны по расплаву около 400 кг. Производительность такой печи — 1000 т/год. Печь имеет две зоны: плавления и выработки (деление на зоны чисто условное). В зоне плавления температура наиболее высокая (2000...2200°С). Во второй зоне происходят гомогенизация расплава и его выпуск из печи при температуре 1860...1960°С при вязкости 8...10 Па·с. Температурный режим в обеих зонах поддерживается путем изменения положения электродов (меньшего и большего их заглубления).

16.2. Изделия из муллитокремнеземистой ваты

Почти все выпускаемое в СССР жаростойкое муллитокремнеземистое волокно (старое название — каолиновая вата) перерабатывается в готовые смеси или в изделия, применяемые в практике индустриального строительства и ремонта тепловых агрегатов. Исключение составляет вата, используемая для заполнения температурных швов между сборными панелями и для других подобных целей.

Готовые смеси употребляют для устройства мастичной изоляции, торкретирования или изготовления монолитных футеровок литьем либо набивкой непосредственно на месте эксплуатации.

Изделия из муллитокремнеземистого волокна могут быть: гибкими (рулонный материал, маты, войлок, шнуры, ленты); жесткими (плиты, скорлупы, сегменты, картон, бумага, изделия сложной конфигурации, блоки).

В настоящее время в мировой практике из жаростойких волокон выпускают около 50 видов различных изделий и по мере расширения областей применения и получения новых более высокотемпературостойких волокон номенклатура их постоянно расширяется.

Согласно действующему в СССР стандарту выпускаемые из муллитокремнеземистого волокна материалы и изделия подразделяют на марки, указанные в табл. 16.3.

Рулонный материал и войлок получают в едином технологическом потоке. Рулонный материал изготовляют из сформированного

[illegible]
нения валками, обрезки кромок продольными [illegible]
вания заготовок заданной длины.

Т а б л и ц а 16.3. Марки муллитокремнеземистых материалов и изделий

Наименование	Марка	Температура применения, °С, не выше
Муллитокремнеземистая вата	МКРВ	1150
Муллитокремнеземистый рулонный материал	МКРР-130	1150
Муллитокремнеземистый хромосодержащий рулонный материал	МКРРХ-150	1300
Муллитокремнеземистый войлок	МКРВ-200	1150
Муллитокремнеземистый хромосодержащий войлок	МКРВХ-250	1300
Муллитокремнеземистые плиты на органической связке	МКРП-340	1150
То же, на неорганической связке	МКРП-450	1150
Муллитокремнеземистые хромосодержащие плиты	МКРПХ-450	1300
Муллитокремнеземистые вставки на органической связке	МКРВ-340	1150
Муллитокремнеземистые изделия сложной конфигурации на органической связке	МКРИ-350	1150
То же, на неорганической связке	МКРИ-500	1150

Примечание. Цифровые значения марки соответствуют средней плотности материалов и изделий, кг/м³.

Рулонный материал характеризуется следующими основными свойствами: средняя плотность — 130 кг/м³, теплопроводность при средней температуре 600°С — 0,22 Вт/(м·°С), температура применения — 1150°С.

При изготовлении войлока в волокнистый ковер вводят синтетическое связующее (поливинилацетатную эмульсию либо этилсиликат) путем впрыскивания в камеру волокноосаждения. Затем ковер по выходе из камеры волокноосаждения подпрессовывают валками до заданной толщины и подвергают тепловой обработке в камере полимеризации. После кратковременного охлаждения на воздухе войлок сворачивают в рулоны и складируют. Его средняя плотность составляет 150 кг/м³, λ при 600°С — 0,2 Вт/(м·°С) и температура применения 1150°С.

Украинским научно-исследовательским институтом огнеупоров разработана технология полужестких теплоизоляционных плит на органическом связующем. Изделия получают путем штучного формования из гидромасс на вакуум-прессе. Приготовление гидромассы осуществляют в вертикальном роторном смесителе или гидроразбивателе. При соотношении волокно : водный раствор связующего, равном 1 : 9, гидромасса приобретает требуемую однородность за 2...5 мин обработки. Формование изделий производят при разрежении 0,05...0,07 МПа и давлении прессования 0,3...0,4 МПа. Влажность отформованных плит составляет 36...45%. Сушат изделия на поддонах полочных вагонеток в течение 12...14 ч при

температуре 100 ... 110°С. Изделия могут применяться в качестве теплоизоляционно-компенсационных материалов. Они характеризуются следующими показателями свойств: средняя плотность — 280 ... 320 кг/м³, сжимаемость под давлением 0,3 МПа — 27 ... 31%, возвратимость после снятия давления — 92 ... 94%, теплопроводность при средней температуре 600°С — 0,174 Вт/(м·°С).

Следует отметить, что синтетическое связующее при действии высоких температур выгорает и термическая устойчивость материала определяется рекристаллизационной способностью волокон, которая зависит как от температуры, так и от продолжительности ее воздействия. Рекристаллизация муллитокремнеземистых волокон отмечается уже при температуре 970°С и по мере повышения температуры она интенсифицируется. Этот процесс и определяет продолжительность службы таких изделий.

Применение огнеупорных связующих позволяет повышать температуру службы изделий на основе муллитокремнеземистых волокон и увеличивать продолжительность их службы. В этом случае при разрушении волокна в горячей зоне материала его прочность сохраняется за счет огнеупорной матрицы (связующего). Поэтому изделия на керамическом связующем обладают более высокими эксплуатационными свойствами.

В МИСИ им. В. В. Куйбышева разработана технология ряда волокнистых изделий различного назначения с применением в качестве связующего огнеупорных глин: компенсационно-теплоизоляционных плит, теплоизоляционно-конструкционных блоков, теплоизоляционных плит.

Теплоизоляционно-компенсационные плиты предназначены для восприятия без разрушения многократных пульсирующих нагрузок, возникающих в результате температурных деформаций огнеупорной футеровки и тепловой изоляции металлического кожуха теплового агрегата, например воздухонагревателя доменной печи. Теплоизоляционно-компенсационные плиты изготовляют из муллитокремнеземистого волокна и огнеупорной глины, взятых в соотношении 78 ... 80 : 22 ... 20% по массе. Изделия формуют из гидромасс на вакуумных прессах. Отформованные плиты сушат в туннельных сушилках при температуре 170 ... 200°С в течение 10 ... 12 ч.

Сжимаемость этих изделий достигает 10 ... 12% благодаря их волокнистому строению и небольшому содержанию связующего. Это свойство изделий можно существенно повысить, применив предварительную грануляцию ваты. Следует отметить, что компенсационные свойства изделий сохраняются и в случае одностороннего воздействия на материал высоких температур (1100 ... 1200°С) за счет необожженной части изделия. Наиболее высокие компенсационные и теплоизоляционные свойства изделий достигаются при их средней плотности 280 ... 330 кг/м³.

Увеличивая содержание связующего и применяя вибрационную обработку при формовании изделий, получают теплоизоляционные плиты типов МКРП-100 и МРКП-450. Эта технология освоена Анрелевским опытным заводом Минмонтажспецстроя СССР. Свойства изделий приведены в табл. 16.4.

Таблица 16.4. Основные свойства плит на основе муллитокремнеземистого волокна и огнеупорной глины

Показатели свойств	Вид изделий		
	теплоизоляционно-компенсационные	безобжиговые (пропиточная технология)	обжиговые типа МКРП
Средняя плотность, кг/м³	280 ... 330	250 ... 400	350 ... 450
Прочность при сжатии, МПа	—	0,08 ... 0,1*	0,7 ... 0,9
Прочность при изгибе, МПа	0,6 ... 0,8	0,4 ... 0,6	0,6 ... 0,7
Сжимаемость, %, при нагрузке 0,2 МПа	12 ... 20	8 ... 12	—
То же, после одностороннего обжига	9 ... 14	5 ... 9	—
Дополнительная линейная усадка при 1200°С	1,1 ... 1,3	1,0 ... 0,9	0,7 ... 0,8
Теплопроводность при температуре 600°С, Вт/(м·°С)	0,14 ... 0,15	0,14 ... 0.16	0,17 ... 0,19
Температура применения, °С	1200	1250	1250

* Показатель прочности при 10%-ном сжатии.

Разновидностью технологии теплоизоляционных плит из муллитокремнеземистой ваты на глиняном связующем является технология, основанная на способе пропитки. В этом случае введение связующего в волокнистый ковер осуществляется без разрушения его структуры — пропиткой низкоконцентрированной глиняной суспензией, осуществляемой за счет капиллярного подсоса. Как известно, тонковолокнистый ковер муллитокремнеземистой ваты вследствие мелкопористой структуры и наличия на поверхности волокон замасливателя очень плохо фильтрует воду. Введение в состав глиняной суспензии гидрофильной добавки (сульфанола) приводит к возникновению активного капиллярного подсоса низкоконцентрированной суспензии огнеупорной глины, в результате которого достигается равномерное распределение связующего в объеме материала.

Технологический процесс в данном случае организуется следующим образом. Ковер муллитокремнеземистой ваты раскраивается на заготовки заданных размеров. Из полученных фрагментов подпрессовкой формуют заготовки толщиной 150 ... 200 мм, что позволяет получать изделия толщиной 100 ... 120 мм.

Глиняную суспензию приготавливают из огнеупорных глин, характеризующихся числом пластичности не менее 15, в высокоскоростном смесителе. При этом вводят добавки: СДБ в количестве 0,3% от массы глины и сульфанола, концентрация которого в суспензии должна быть равна 1%. Концентрация глины в суспензии может находиться в пределах 7 ... 15%.

Пропитку заготовок осуществляют в емкостях при их естественном погружении в глиняную суспензию. Процесс пропитки продолжается в течение 18 ... 20 мин. Пропитанные заготовки на сетчатых

поддонах с помощью механических «вил» извлекаются из ванны и подпрессовываются под нагрузкой 0,01 ... 0,1 МПа с целью отжатия излишка связующего. Последним этапом технологического процесса является сушка заготовок, которая осуществляется в туннельных сушилках при температуре теплоносителя 120 ... 180°С до остаточной влажности не более 2%.

Складируют плиты, укладывая их горизонтально в штабеля высотой не более 1,8 м. Плиты имеют размеры (650 ... 1000) × (200 ... 400) × (80 ... 120) мм и характеризуются средней плотностью от 250 до 400 кг/м³ в зависимости от величины подпрессовки. Основные свойства плит приведены в табл. 16.3. Плиты предназначены для устройства съемных сводов промышленных печей с рабочей температурой до 1200°С.

В настоящее время разработана конвейерная технология теплоизоляционных плит, получаемых способом пропитки. В этом случае ковер муллитокремнеземистой ваты, предварительно раскроенный в продольном и поперечном направлениях, на сетчатой ленте конвейера поступает в ванну с глиняной суспензией и после естественной пропитки на той же ленте выносится из ванны. Пропитанные глиняной суспензией заготовки с помощью вильного захвата подаются на пост подпрессовки и укладываются там на перфорированный поддон в 2 ... 3 слоя по высоте (в зависимости от требуемой толщины плит). После подпрессовки и частичного отжатия воды плиты на поддонах направляют на сушку.

Третьим видом изделий из муллитокремнеземистой ваты на глиняном связующем являются конструкционно-теплоизоляционные блоки, получаемые из гидромасс. Они предназначены для устройства ограждающих конструкций промышленных тепловых установок с рабочей температурой до 1250°С. Глина, применяющаяся для изготовления изделий, должна характеризоваться числом пластичности не менее 15. Для улучшения перемешивания в воду затворения следует добавлять сульфанол и СДБ.

Технологический процесс изготовления керамоволокнистых блоков включает следующие операции: подготовку ваты, подготовку связующего, приготовление гидромассы, формование изделий с немедленной распалубкой, их сушку и обжиг. Подготовка ваты сводится к ее распушке на трепальной установке до кусков размером не более 50 мм. Этот процесс осуществляется следующим образом. Ковер муллитокремнеземистой ваты в один слой подается к трепальной установке, а выходящая из нее распушенная вата ленточным транспортером направляется непосредственно в смеситель для приготовления формовочной массы. Этот процесс периодический, его период определяется временем приготовления формовочной массы и разгрузки смесителя. Поэтому ковер ваты, подаваемый на распушку, необходимо предварительно дозировать по массе

Подготовка связующего заключается в приготовлении глиняного шликера 30 ... 40%-ной концентрации, которое осуществляется в пропеллерном смесителе в течение 30 ... 35 мин. При этом вначале в смеситель заливается вода, а затем загружается сухая молотая глина; после перемешивания смеси в течение 20 мин в смеситель добавляют раствор пластифицирующей добавки из расчета 0,3% от массы глины, считая на сухое вещество. После этого процесс перемешивания продолжают еще 10 мин до полного роспуска глины. Готовый шликер перекачивают в расходный бак-смеситель.

Приготовление формовочной массы производят в низкоскоростном смесителе с горизонтальным валом при такой последовательности загрузки компонентов. Вначале подают отдозированные по объему глиняный шликер и воду и после перемешивания в течение 1 мин добавляют пенообразователь в количестве 0,15 ... 0,2% от суммарного количества воды в гидромассе. Перемешивание осуществляют в течение 3 мин до образования пеномассы, после чего небольшими порциями загружают распушенную вату при непрерывном перемешивании. Общая продолжительность приготовления формовочной смеси составляет 5 ... 6 мин, включая время загрузки ваты, и зависит от степени распушки ваты.

Критерием оценки готовности гидромассы является полная пропитка ваты шликером, при этом средний размер кусочков ваты не должен превышать 20 мм. Водосодержание гидромассы должно находиться в пределах 150 ... 200% в зависимости от расхода ваты.

Наличие в гидромассе пузырьков пены существенно облегчает ее приготовление, так как пузырьки, играя роль шарниров, способствуют роспуску волокна и предотвращают его свойлачиваемость.

Формование изделий осуществляют в формах с перфорированным днищем. Заполнение форм гидромассой можно производить непосредственно из смесителя или из промежуточной емкости, а также путем набрызга с использованием специальной установки. В последнем случае изделия получают с улучшенной структурой и повышенной на 10 ... 15% прочностью. Уплотнение массы в форме производят вибропрессованием с вакуумированием или без него. Параметры виброуплотнения, обеспечивающие заданную плотность сырца и удаление излишка воды, должны быть следующие: частота — 50 Гц, амплитуда — 0,4 ... 0,5 мм, продолжительность — 220 180 с, усилие прессования — 0,008 ... 0,014 МПа.

Отформованный сырец распалубливают и на жестких поддонах направляют на тепловую обработку. Тепловая обработка конструкционно-теплоизоляционных блоков состоит из сушки и обжига. Сушка может осуществляться по скоростному и достаточно жесткому режиму: подъем температуры до 200 ... 300°С — 0,5 ... 0,1 ч, выдержка при максимальной температуре 6 ... 8 ч, до остаточной влажности не более 8% (охлаждение блоков не регламентируется).

Обжиг блоков необходим для снятия усадочных явлений в материале (недопущения их в службе) и повышения прочностных показателей изделий. Обжиг можно осуществлять в печах любого типа по жестким режимам или по тем режимам, при которых предполагается эксплуатация изделий.

Блоки могут выпускаться со следующими размерами: длина 400 ... 1000 мм, ширина 300 ... 700 мм, толщина 50 ... 300 мм. Средняя плотность блоков определяется соотношением «вата : глина», которое может быть принято равным 60 : 40; 50 : 50; 40 : 60, % по массе. В этом случае средняя плотность блоков колеблется в пределах 400 ... 700 кг/м^3; прочность при сжатии — 0,6 ... 2,0 МПа; прочность при изгибе — 0,4 ... 1,0 МПа; теплопроводность при температуре 600°С — 0,15 ... 0,22 Вт/(м·°С), дополнительная усадка при температуре 1250°С — не более 1%; максимальная температура применения — до 1250°С.

Высокие функциональная и строительно-эксплуатационные свойства волокнистых жаростойких теплоизоляционных материалов определили их широкое производство и применение в технике высоких температур. Мировая практика свидетельствует о чрезвычайно высокой эффективности этих материалов. Поэтому совершенствование их технологии, повышение качества изделий, расширение областей применения являются важной народнохозяйственной задачей. Основными направлениями исследований в этой области являются: получение волокон с более высокой термостабильностью и коррозионной стойкостью, создание технологии волокнистых жаростойких изделий, обеспечивающей малую энергоемкость, высокую степень механизации и автоматизации производственных процессов и управления ими.

ЧАСТЬ VI

ТЕХНОЛОГИЯ АКУСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

В пятой главе учебника достаточно подробно рассмотрена оптимизация пористой структуры звукопоглощающих и звукоизоляционных материалов, изготовляемых из различного вида сырья. Поэтому в данной части учебника основное внимание уделяет освещению особенностей технологических приемов, позволяющих получать материалы и изделия с оптимальной или близкой к ней пористой структурой, обеспечивающей высокие функциональные строительно-эксплуатационные свойства акустических материалов и изделий.

ГЛАВА 17

ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИЕ И ЗВУКОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

По механизму звукопоглощения все звукопоглощающие материалы делят на *пористые* и *резонансные* поглотители. Механизм звукопоглощения у этих разновидностей различен. В пористых поглотителях звук гасится за счет вязкого трения воздуха о стенки пор и превращения части звуковой энергии вследствие этого в теплоту; потери звуковой энергии происходят также благодаря деформации скелета материала и его активного сопротивления вынужденным колебаниям, возникающим под давлением звуковых волн. Поэтому пористые поглотители с жестким скелетом (фибролит, пеностекло, ячеистые бетоны, акустические штукатурки и др.), которые гасят звук только за счет вязкого трения воздуха о стенки пор, менее эффективны, чем пористые поглотители с гибким скелетом (минераловатные, стекловолокнистые изделия, древесно-волокнистые материалы и др.).

Звуковая энергия, падающая на плотный материал, поглощается тем меньше, чем выше плотность материала. Это происходит из-за отражения звуковой энергии от поверхности материала. Отражение звуковых волн уменьшается, когда сопротивление материала падающей звуковой волне приближается к удельному сопротивлению воздуха, т. е. когда увеличивается содержание воздуха в материале (его пористость). Однако при значительном увели-

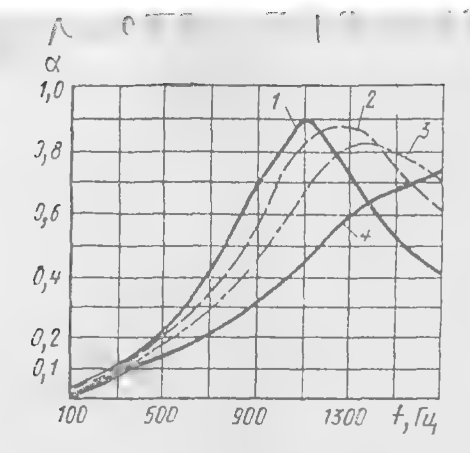


Рис. 17.1. Влияние степени перфорации на звукопоглощение плит при диаметре отверстий 5 мм: степень перфорации, %: 1 — 7,5; 2 — [illegible]; 3 — 12,5; 4 — [illegible]

с максимумом поглощения при частотах 1100 Гц. При повышении степени перфорации максимум поглощения сдвигается в область более высоких частот.

Минераловатные звукопоглощающие плиты выпускают на основе минеральной ваты, полученной фильерно-дутьевым способом. Заготовки для плит производят по конвейерной технологии, аналогичной технологии теплоизоляционных плит, но при большем (в 1,3...1,6 раза) уплотнении ковра и увеличенном (в 2...2,5 раза) содержании связующего. Связующим является композиция, состоящая из 70% поливинилацетатной эмульсии (ПВАЭ) и 30% фенолспиртов. Для получения калиброванных по толщине плит с гладкой поверхностью и торцами заготовки подвергают шлифовке, снятию фасок, нанесению фактурного слоя, сверлению отверстий при сплошном фактурном слое и окраске.

Минераловатные звукопоглощающие плиты на крахмальном связующем. Этот вид звукопоглощающих материалов нашел широкое применение в строительстве благодаря высоким физико-механическим и акустическим показателям. Наиболее широко плиты используют при устройстве подвесных потолков в зданиях культурно-бытового, административного и промышленного назначения.

Существует несколько разновидностей технологии таких плит, отличающихся главным образом соотношением минерального волокна и связующего в формовочной массе, и, как следствие этого, — способом формования заготовок. Различают следующие виды технологических решений: 1) формовочная технология, которая характеризуется соотношением волокно : связующий раствор, равным 1 : 2,5 ... 1 : 3,5; при формовании не происходит отделения связующего (плиты «Акмигран»); 2) формовочная технология, для которой показательно соотношение волокно : связующий раствор, равное 1 : 6 ... 1 : 10; при формовании происходит частичный отжим связующего (плиты «Акминит»); 3) отливочная технология, характеризующаяся соотношением волокно : связующий раствор, равным 1 : 50 ... 1 : 100; формование плит идет при интенсивном отделении жидкой фазы из гидромассы (плиты МВП — минераловолокнистые плиты).

Из перечисленных разновидностей технологии самое широкое распространение получило первое технологическое решение (плиты «Акмигран»).

Для производства минераловатных плит на крахмальном связующем используют следующие сырьевые материалы: минеральную вату, крахмал, каолин и добавки, улучшающие конечные свойства материала (парафин, борная кислота) (табл. 17.1).

Важнейшими характеристиками минеральной ваты, от которых зависит качество готовых изделий, являются: диаметр волокна, содержание неволокнистых включений и модуль кислотности $М_к$. Оптимальным является волокно с диаметром 6 ... 8 мкм. Присутствие «корольков» в плитах снижает физико-механические и акустические показатели материала, приводит к повышенному износу деталей и узлов технологического оборудования. Поэтому на стадии подготовки минерального волокна предусматривается отделение «корольков».

Таблица 17.1. **Состав формовочной массы для плит «Акмигран»**

Наименование компонентов	Содержание, вес/ч	Расход компонентов, кг	
		на 1 м²	на 1 м³
Минеральная вата	100	12 ... 14	600 ... 700
Крахмал	12 ... 14	1,5 ... 2,0	75 ... 100
Каолин	14 ... 20	2,0 ... 2,4	100 ... 120
Борная кислота	0,5 ... 0,8	0,06 ... 0,09	3,0 ... 4,5
Парафин	1,6	0,18 ... 0,2	9,0 ... 10,0

Применение технических крахмалов в качестве связующего для звукопоглощающих плит связано с большим выходом клеящей массы при нагревании крахмальной суспензии. В естественном состоянии крахмалы нерастворимы в воде, их адсорбционная влажность доходит до 25 ... 30%. При нагревании до 60°С кукурузный крахмал набирает до 300, а при 70°С — около 1000% воды. При максимальной клейстеризации зерно крахмала вбирает до 2500% воды. При перемешивании или их химической обработке набухшие зерна крахмала разрываются.

Для повышения огне-, био- и влагостойкости изделий крахмал применяют в сочетании с целым рядом минеральных и органических добавок, с которыми он образует композиционное связующее. В качестве основных добавок при приготовлении крахмального клейстера применяют минеральные наполнители (каолин, бентонит, асбест и др.), антипирены (буру, борную кислоту), антисептики (буру, сульфат меди, сульфат цинка и др.), а также другие добавки, повышающие водостойкость. Часто добавки выполняют несколько функций. Так, введение каолина не только повышает выход клеящей массы, но и уменьшает усадку материала при сушке, повышает сопротивление материала действию огня. Борная кислота является одновременно и антисептиком, и антипиреном. Из добавок, повышающих водостойкость материала, применяют гидрофобные (парафин, стеарин, воск и др.) и гидрофобизирующие до-

бавки (клееканифольное мыло, кремнийорганические жидкости и др.).

Основными технологическими операциями при изготовлении плит «Акмигран» являются: грануляция минеральной ваты, приготовление крахмально-каолинового связующего, приготовление формовочной массы, формование заготовок, их сушка, механическая обработка, окраска лицевой поверхности, упаковка и складирование готовой продукции.

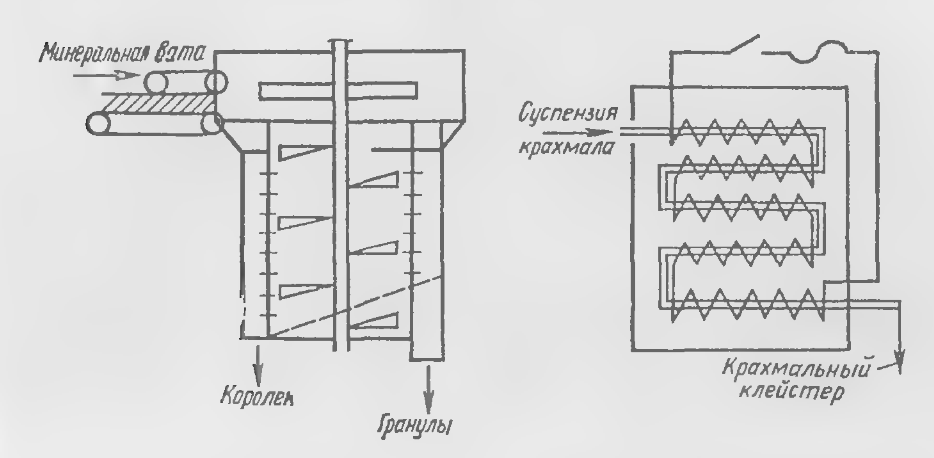


Рис. 17.2. Схема вертикального трубного гранулятора

Рис. 17.3. Схема устройства для непрерывной заварки крахмала

Грануляция минеральной ваты осуществляется в основном двумя методами: разрывом ваты на клочки с последующей закаткой в гранулы или разрезкой минераловатного ковра на кусочки размерами, близкими к размерам гранул с последующей их закаткой. При разрыве ваты на клочки используют колковые барабаны с разным диаметром или с разной скоростью вращения, а также вертикальный гранулятор, который представляет собой наиболее простое и надежное устройство (рис. 17.2). В нем разрыв ваты на клочки сочетается с их окаткой и выделением «корольков». Размер гранул, степень их окатки и производительность гранулятора регулируются путем изменения времени пребывания материала в грануляторе. Для этой цели разгрузочное отверстие снабжено специальным шибером. При резке минераловатного ковра применяют дисковые грануляторы. В дисковом грануляторе происходит продольная и поперечная резка минераловатного ковра. Полученные столбики при транспортировании в шнеке машины самопроизвольно распадаются на кубики. При этом происходит их закатка и частичное отделение «корольков». Дисковые грануляторы отличаются повышенной производительностью и надежностью при получении гранул требуемого гранулометрического состава.

Изменение величины и плотности гранул позволяет регулировать физико-механические и акустические свойства изделий. Использование гранул обеспечивает получение структуры с двумодальной пористостью: мелкие поры — внутри минераловатных гранул, крупные поры — между гранулами. Применяют гранулированную минеральную вату с размерами гранул 5 ... 12 мм, насыпной плотностью 100 ... 150 кг/м³.

Приготовление крахмального связующего включает следующие технологические операции: получение суспензии крахмала в холодной воде; приготовление крахмально-каолиновой суспензии; варку крахмально-каолинового связующего при температуре 85 ... 90°С; последовательное введение добавок, улучшающих эксплуатационные свойства изделий. Эти добавки вводят в виде эмульсий (парафин) или растворов (борная кислота) при постоянном перемешивании связующего. Схема устройства для непрерывной заварки крахмала показана на рис. 17.3. Подвод теплоты осуществляется от паровых или электрических нагревателей. Непрерывность процесса и надежность в работе такого устройства позволяют отказаться от громоздких баков, предназначенных для периодической заварки крахмала.

Приготовление формовочной массы предусматривает введение в ее состав достаточного количества клеящих веществ и равномерное их распределение по всему объему. Значительное влияние на выполнение этих условий оказывают фракционный состав и плотность гранул минеральной ваты, концентрация связующего и продолжительность перемешивания. Регулирование количества связующего в массе достигается главным образом за счет концентрации крахмального клейстера. Обычно влажность формовочной массы колеблется в пределах 230 ... 250%. Для приготовления формовочной массы применяют чаще всего лопастные смесители непрерывного действия.

Формование заготовок заключается в равномерном распределении массы по плоскости конвейера или формы-поддона и подпрессовке ее до необходимой плотности. В ряде случаев формование заготовок связано с одновременным получением фактуры за счет поверхностного разрыва массы. Различные типы формовочных устройств разработаны применительно к формовочным массам с различными пластично-вязкими свойствами. Так, устройства *а* и *б* (рис. 17.4) предназначены для формования пластичных масс и предусматривают поверхностный разрыв материала (образование трещин) за счет прижимных пластин или различия скоростей движения несущей и прижимной лент конвейеров. Устройство *в* предназначено для укладки масс пониженной влажности методом напыления. В этом случае калибровка заготовок по толщине, офактуривание их поверхности осуществляются с помощью быстровращающегося профилированного валика.

Тепловая обработка заготовок заключается в их сушке до остаточной влажности около 1%. Для сушки плит наибольшее распро-

странение получили туннельные сушилки с конвективным обогревом материала. Длительность сушки в зависимости от исходной влажности заготовок колеблется в пределах 16 ... 24 ч, максимальная температура теплоносителя — 160 ... 170°С.

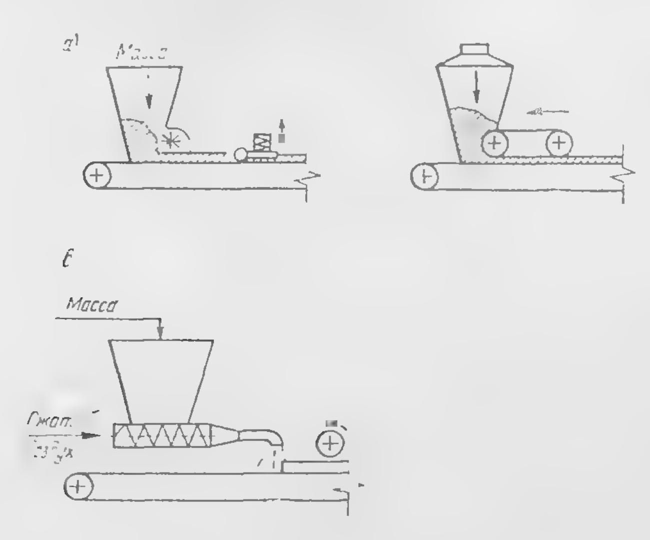


Рис. 17.4. Схемы устройств для распределения формовочной массы на ленте конвейера:

а, б — для укладки пластичных масс; *в* — для масс пониженной влажности (методом напыления)

Высушенные заготовки после акклиматизации в цехе подвергаются механической обработке, которая включает следующие операции: шлифовку лицевой и тыльной поверхностей, обрезку кромок и раскрой заготовок на плиты заданных размеров, образование монтажного паза, снятие фасок и нанесение фактурного рисунка. Все операции, связанные с механической обработкой заготовок, выполняют на высокомеханизированных линиях с высокой степенью автоматизации. Заключительной стадией производства минераловатных декоративно-акустических плит типа «Акмигран» является их окраска и упаковка в тару.

Производительность технологических линий, выпускающих плиты типа «Акмигран», колеблется от 7 ... 10 до 50 тыс. м²/год. В стадии освоения находятся более мощные линии производительностью от 100 до 200 тыс. м²/год.

Размер изделий, выпускаемых на существующих линиях, составляет 300×300×20 мм. Фактура их большей частью трещиноватая.

Производство звукопоглощающих плит по технологии с *отжимом связующего* имеет много общего с рассмотренной технологией. Отличительные особенности этого способа — использование связующих более низкой концентрации (3 ... 3,5% по крахмалу); минераловатные гранулы отличаются более окатанной формой, меньшими размерами и более высокой средней плотностью (150 ... 200 кг/м³).

Процесс производства по этой технологии выглядит следующим образом. Минеральная вата разрывается в трепальных барабанах на клочки, которые затем подаются в вертикальный трубный гранулятор. Гранулы размером 3 ... 8 мм проходят через конический сепаратор, где выделяются неволокнистые включения и мелкие фракции. Крахмально-каолиновое связующее подается в барабанный смеситель для перемешивания с гранулами. Формование заготовок осуществляется на сетчатом конвейере. Формующее устройство снабжено приемным лотком, уплотняющими валиками, камерой отсоса и набором сменных валиков для получения фактуры лицевой поверхности. Удаление излишней связки из массы при формовании происходит за счет механического отжима валками и разрежения, создаваемого в камере отсоса. Ожатый раствор связующего после соответствующей корректировки направляется на повторное использование. Сушка заготовок осуществляется в туннельных сушильных камерах на вагонетках при максимальной температуре теплоносителя 150 ... 170°С. Механическая обработка заготовок при получении плит не отличается от рассмотренной выше.

Производительность технологических линий, работающих по этому способу, примерно такая же, что и при выпуске плит типа «Акмигран».

Технология, основанная на *способе отлива,* предусматривает формование волокнистого ковра на сетке отливочной машины из низкоконцентрированной гидромассы. Технологический процесс в этом случае состоит из следующих основных операций: рыхления и разрыва минеральной ваты на клочки, получения суспензии минеральной ваты, дозирования и подготовки крахмала и других добавок, приготовления отливочной композиции, формования ковра на отливочной машине, раскроя ковра на изделия тепловой обработки и нанесения фактуры, окраски и упаковки изделий.

В этом случае подготовка минеральной ваты сводится к получению гидромассы с концентрацией 1 ... 3%. Приготовляют гидромассу в гидросмесителях периодического или непрерывного действия. Рабочими органами гидросмесителей являются валы с лопастями или с системой штырей. Как и грануляция ваты, ее суспензирование предусматривает отделение «корольков». Гидросепарация корольков, как правило, проходит более полно. Для приготовления гидромассы минеральную вату подают из камеры волокноосаждения в систему рыхлителей, где она разрывается на отдельные клочки и освобождается от части «корольков».

Низкоконцентрированную отливочную композицию, содержащую все необходимые компоненты, приготовляют в массных бассейнах. Важнейшим условием приготовления качественных отливочных смесей является предотвращение расслоения гидромассы и обеспечение заданных концентраций. Готовая формовочная композиция по трубопроводам подается к отливочной длинносетчатой машине, на которой формуется волокнистый ковер. Этот процесс

включает следующие операции: напуск волокнистой массы на сетку машины, обезвоживание массы и формирование волокнистого ковра при свободной фильтрации; интенсификацию обезвоживания ковра вакуумированием; уплотнение ковра с дополнительным обезвоживанием за счет механической подпрессовки. Обычно конечная влажность ковра составляет 150 ... 180%, что обеспечивает достаточную прочность заготовок для их съема и транспортирования в камеру тепловой обработки.

В этом случае тепловая обработка отформованных заготовок состоит из двух стадий: клейстеризации крахмала и сушки плит. Клейстеризацию крахмала и сушку плит осуществляют в многоярусных сушильных камерах с зонным регулированием температуры: 100°C — в зоне клейстеризации, 160 ... 170°C — в зоне постоянной скорости сушки и 100 ... 120°C — в зоне падающей скорости сушки. Общая продолжительность тепловой обработки — 8 ... 12 ч. После сушки плиты для снятия напряжений выдерживают в цехе, а затем направляют на распиловку, механическую обработку, грунтовку и офактуривание, которое производится с учетом декоративных и акустических свойств изделий.

Технологические линии производства плит отливочным способом имеют производительность от 1 до 5 млн. м² в год. Плиты могут иметь следующие размеры: 300×300, 600×600 и 1200×1200 мм при толщине 12 ... 16 мм. Физико-механические показатели звукопоглощающих плит на крахмальном связующем приведены в табл. 17.2.

Таблица 17.2. **Физико-механические свойства звукопоглощающих минераловатных плит на крахмальном связующем**

Показатели	«Акмигран»	«Акминит»	МВП
Средняя плотность, кг/м³	350 ... 450	350 ... 450	350 ... 450
Прочность при изгибе, МПа	1,0 ... 1,5	1,0 ... 1,4	1,2 ... 1,8
Твердость, МПа	1,2 ... 1,7	1,1 ... 1,6	1,6 ... 1,8
Структурная прочность (сыпаемость), %	15 ... 20	12 ... 16	10 ... 15
Реверберационный коэффициент звукопоглощения	0,6 ... 0,8	0,6 ... 0,8	0,5 ... 0,65

Плиты из ячеистого бетона «Силакпор». «Силакпор» — газосиликатный высокопористый материал, выпускаемый в виде плит, лицевая сторона которых подвергается механической обработке с целью придания материалу повышенных декоративно-акустических свойств. Технология получения заготовок аналогична технологии теплоизоляционного ячеистого бетона. Отличительной особенностью (в связи с изменением функциональных свойств) является создание высокопористой структуры с сообщающимися порами, что достигается повышением количества газообразователя в составе газосиликатной массы и некоторым повышением ее водосодержания.

В связи с этим производство звукопоглощающих плит «Силакпор» без существенных дополнительных капиталовложений может быть освоено на любом предприятии, выпускающем ячеистый силикатобетон.

Для этого необходимо организовать линию механической обработки заготовок. На такой линии производят следующие технологические операции: шлифовку лицевой поверхности заготовок с целью раскрытия пористости и нанесение рельефного рисунка для повышения звукопоглощения и улучшения декоративных свойств материала, обработку кромок предварительно откалиброванных плит.

Плиты «Силакпор» выпускают размером 400×400 и 450×450 мм при толщине 35 и 45 мм. Их средняя плотность не превышает 350, 400 кг/м³, а реверберационный коэффициент звукопоглощения при частотах 125 ... 4000 Гц колеблется в пределах 0,12 ... ... 0,95 (при 1000 Гц — 0,75). Плиты «Силакпор» нашли применение для внутреннего акустического оформления потолков и стен общественных и производственных (вычислительных центров, машинописных бюро, кинотеатров и др.) помещений.

Плиты декоративно-акустические двухслойные. Этот тип декоративно-акустических плит имеет ряд разновидностей, отличающихся друг от друга видами материалов и местом расположения звукопоглотителя.

Широкое применение, например, нашли *литые гипсовые плиты*. Они представляют собой строительные изделия, изготовленные из перфорированного гипсового экрана, укрепленного ребрами, и звукопоглотителя, в качестве которого чаще всего применяют минераловатные полужесткие и жесткие изделия, обернутые в защитный слой. При этом сторона звукопоглотителя, примыкающая к гипсовому экрану, должна быть защищена акустически прозрачным материалом, а тыльная сторона — несгораемым плотным материалом. Эти изделия применяют для декоративно-акустического оформления потолков и стен. Плиты выпускают размером 600×600×(30 ... ... 40) мм; коэффициент звукопоглощения зависит от вида и величины перфорации, толщины слоя и вида звукопоглотителя, которые должны рассчитываться в каждом отдельном случае в зависимости от характеристик шума в данном помещении. Коэффициент перфорации плит, выпускаемых отечественными предприятиями, колеблется в пределах 12 ... 35%; их прочность при изгибе в сухом состоянии должна быть не менее 4 МПа.

Другой вид двухслойных декоративно-акустических плит изготовляют путем наклейки плит «Акмигран» на гипсокартонные листы (плиты). Клеем служит смесь, состоящая из 50% поливинилацетатной эмульсии, 40% силиката натрия и 10% воды. Плиты выпускают размером 500×500×30 мм, для чего используют гипсокартонные листы размером 500×500×10 мм и плиты «Акмигран» размером 240×240×20 мм. Коэффициент звукопоглощения плит в диапазоне частот 500 ... 1000 Гц — не менее 0,6 и 0,7 соответственно.

Двухслойные древесно-волокнистые плиты изготовляют путем склеивания перфорированной твердой плиты с изоляционной мягкой плитой. Перфорация таких плит может быть щелевой или круглой. Эти плиты представляют собой крупноразмерные изделия длиной 1,8 ... 2,7 м, шириной 0,5; 1,2; 1,6; 1,8 м. Применяют их [illegible] облицовки помещений общественных зданий. Коэффициент [illegible] поглощения двухслойных древесно-волокнисты[illegible] частот 250 ... 2000 Гц находится в пределах 0,4 ... [illegible]

Кроме перечисленных видов двухслойных декоративно-акустических изделий производят изделия из перфорированных асбестоцементных, дюралюминиевых экранов в сочетании со звукопоглотителями.

Непосредственно на месте производства строительных работ готовят и применяют звукопоглощающие штукатурки, наполняя штукатурные растворы высокопористыми заполнителями, чаще всего перлитовым песком, мелкими фракциями туфов и др.

17.2. Перспективы развития производства и применения эффективных видов декоративно-акустических материалов

В отделке современных общественных и промышленных зданий все большее значение приобретают акустические облицовки потолков и верхней части стен эффективными звукопоглощающими материалами. В ряде общественных и производственных зданий декоративно-акустические облицовки стали неотъемлемым элементом интерьера, создающим благоприятные условия для работы и отдыха, повышающим комфорт и акустическое благоустройство помещений. Палитра декоративно-акустических материалов, выпускаемых отечественной промышленностью, пока еще явно недостаточна и должна быть существенно расширена. Перспективным направлением развития производства и использования в строительстве акустических материалов следует считать применение пеногипсовых систем, позволяющих путем различных технологических приемов создавать материалы с необходимыми заданными свойствами. Примером развития этого направления являются работы МИСИ им. В. В. Куйбышева по созданию новой технологии акустических и декоративно-акустических материалов на основе пеногипса.

Основой новой технологии явилась разработка эффективного способа получения пеногипса, позволяющего целенаправленно и с большой степенью надежности регулировать свойства получаемого материала.

Технология пеногипсовых декоративно-акустических материалов предполагает возможность регулирования физико-механических свойств изделий в процессе их изготовления. Так, регулирование средней плотности достигается путем изменения кратности пены и степени ее заполнения гипсовым вяжущим, размера пор — изменением скорости вращения рабочего органа пеногенератора, прочностных показателей — применением полимерных добавок и степенью армирования диспергированным минеральным волокном, звукопоглощающих свойств — кратностью и кинетической устойчивостью пены и т. д.

Технология изделий на основе пеногипсовых систем включает следующие технологические операции: предварительную подготовку исходных компонентов, вспенивание раствора ПАВ, минерализацию полученной пены, виброформование пеногипсовой массы, тепловую обработку заготовок и их механическую обработку. Технология предполагает непрерывный режим работы оборудования, обеспечивающий конвейерный способ производства.

Исходными компонентами для получения пеногипсовых декоративно-акустических изделий являются: гипсовое вяжущее марки не ниже Г-5, пенообразователь — синтетическое ПАВ анионоактивного класса, полимерные (дисперсия ПВА) и волокнистые (рубленое стекловолокно) добавки.

Таблица 17.3. **Расход исходных компонентов на 1 м² и 1 м³ изделий**

Наименование исходных компонентов	Содержание, вес/ч	Средний расход, кг	
		на 1 м²	на 1 м³
Гипсовое вяжущее	100	8	400
Вода (по В/Г)	40 ... 70	4,8	240
Синтетическое ПАВ	0,1 ... 0,2	0,016	0,8
Дисперсия ПВА	1 ... 5	0,3	15
Стеклянное волокно	0,5 ... 1,0	0,04	2,0

Подготовка исходных компонентов заключается в приготовлении раствора ПАВ нужной концентрации и рубки стекложгута на волокна длиной 0,5 ... 1,0 см. Приготовление раствора ПАВ предусматривает также введение в него дисперсии ПВА и части рубленого волокна. Основная часть волокна (80%) вводится в массу вместе с гипсовым вяжущим.

Таким образом, в результате выполнения предварительной подготовки компонентов все материалы находятся либо в гидромассе (ПАВ, волокно ПВА), либо в гипсовом вяжущем (волокно).

Вспенивание раствора ПАВ осуществляется в вертикальном лопастном смесителе. При этом обеспечивается получение пены с нужным размером ячеек и с равномерным распределением волокна по объему пены. Минерализация пены является процессом приготовления формовочной пеномассы, который должен обеспечивать равномерное распределение гипсового вяжущего и волокна по объему пены и структурирование массы путем регулирования продолжительности и интенсивности перемешивания. Минерализация пены (введение в техническую пену сухого гипса) осуществляется в лопастных или пальчиковых смесителях с $n = 500 \dots 800$ мин⁻¹. Пластично-вязкие свойства пеномассы регулируются за счет изменения соотношения пены и гипсового вяжущего.

Формование изделий из пеногипсовых масс заключается в равномерном распределении массы по плоскости конвейера, ее уплот-

нении и калибровке. Для облегчения процесса формования целесообразно применять вибрацию со следующими параметрами: продолжительность — 20 ... 30 с, частота — 50 Гц, амплитуда — 0,5 мм. За счет тиксотропных свойств массы снижаются предельное напряжение сдвига и вязкость, в результате чего обеспечивается удаление крупных воздушных пузырей и улучшается растекание массы в форме-поддоне или на ленте конвейера. Формовочный конвейер может быть выполнен в виде ленты шириной (по заготовке) 350, 630, 1100 мм. Вибратор устанавливают в месте подачи пеногипсовой массы на ленту конвейера. Для образования трещиноватой структуры на лицевой поверхности заготовок конвейер можно оборудовать прижимными рейками, валиками, щетками и т. д., что дает возможность разнообразить фактуру.

Сушка заготовок является весьма ответственной операцией, ее начало должно осуществляться через 25 ... 30 мин после схватывания гипсового вяжущего. При этом на первой стадии сушки желательно обеспечивать обдув заготовок теплоносителем с температурой 45 ... 50°С, с последующим повышением температуры до 70 ... ... 75°С, т. е. целесообразна зонная сушка заготовок. Общая продолжительность сушки не превышает 5 ч.

Отделочные операции пеногипсовых изделий не отличаются от отделочных операций плит «Акмигран» или «Акминит».

Второй разновидностью технологии с применением пеногипсовых систем является технология декоративно-акустических изделий из гранулированной минеральной ваты и поризованного гипсового связующего (рис. 17.5).

Грануляция минеральной ваты осуществляется теми же способами, что и при получении минераловатных плит на керамической связке. Далее технологический процесс включает приготовление пеногипсовой массы и подготовку раствора смачивателя, который применяют для обеспечения гидрофильности минераловатных волокон и лучшего их сцепления с гипсовым вяжущим. В качестве смачивателя можно использовать растворы дисперсии ПВА, производных целлюлозы, оклейстеризованного крахмала и др. Во всех случаях смачиватель должен иметь гидрофильную природу и обладать вяжущими свойствами. С целью снижения расхода смачивателя его целесообразно подвспенивать, что также позволит снизить увлажненность минеральных волокон.

Приготовление гомогенной массы заключается в последовательном смешивании минераловатных гранул с раствором смачивателя и пеногипсовой массой. На первой стадии гранулы легко пропитываются раствором смачивателя благодаря его низкой вязкости, на второй стадии значительно облегчается пропитка гранул пеногипсовым вяжущим — более вязкой системой.

Формирование структуры материала осуществляется методом воздушного напыления. Напыление производят послойно при влажности массы 100 ... 120%. Процесс формирования структуры целесообразно сопровождать вибрационным воздействием, способствую-

щим более полному омоноличиванию гранул и волокон. Таким образом, процесс формования заготовок включает: распределение формовочной массы с помощью воздушного напыления и кратковременной вибрации, схватывание и твердение гипсового вяжущего. Все процессы, связанные с формованием заготовок, осуществляются непрерывно.

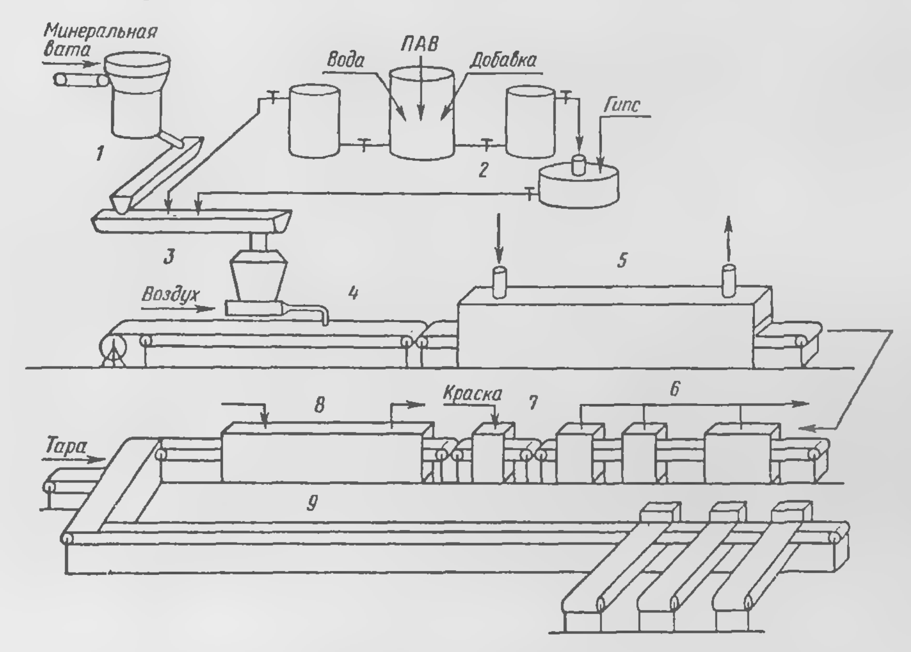


Рис. 17.5. Принципиальная технологическая схема производства декоративно-акустических материалов на основе пеногипсовых систем и гранулированной минеральной ваты:

1 — отделение подготовки минеральной ваты (грануляции); *2* — отделение приготовления пеногипсовой массы; *3* — приготовление формовочной смеси; *4* — формование заготовок (методом воздушного напыления); *5* — сушка заготовок; *6* — отделение механической обработки заготовок; *7* — пост окраски лицевой поверхности изделий; *8* — сушка окрашенных изделий; *9* — отделение упаковки готовых изделий

Тепловая обработка отформованных заготовок завершает процесс структурообразования материала. Тепловую обработку заготовок в данном случае рекомендуется производить в многозонной камере конвейерного типа при температуре теплоносителя от 50 до 90°С.

Отделочные операции (шлифовку, калибровку, покраску и сушку после покраски) выполняют на том же оборудовании, что и при производстве пеногипсовых плит, плит «Акмигран» и др.

Рассмотренные новые виды декоративно-акустических изделий обладают достаточно высокими физико-механическими, декоративными и акустическими свойствами, близкими (особенно у минераловатно-пеногипсовых плит) к свойствам плит типа «Акмигран».

Кроме того, пеногипсовые системы можно использовать для получения декоративно-акустических материалов и изделий в сочетании с высокопористыми заполнителями, такими, как вспученный перлит, стеклопор и др. Имеется опыт применения пеногипса в качестве самонивелирующихся звукоизоляционных стяжек под полы, облегченных внутренних перегородок, характеризующихся высокими акустическими свойствами.

Хорошими звукопоглощающими свойствами обладают некоторые виды пенопластов, например плиты пенополиуретановые и типа «Виниор».

В настоящее время в стране выпускается довольно большая номенклатура звукопоглощающих материалов с достаточно высокими показателями свойств. Работы по созданию новых более эффективных материалов этого типа, а также по совершенствованию их технологии ведутся во многих научных, проектных организациях и вузах страны. При этом большое внимание обращается на декоративные свойства изделий, так как звукопоглощающие конструкции практически во всех случаях определяют эстетический уровень помещений. Особенно это относится к зданиям общественно-культурного, спортивно-массового, лечебно-оздоровительного, административного назначения.

Сочетание декоративных свойств и хорошего звукопоглощения является наиболее сложной задачей в технологическом отношении. Поэтому именно в этом направлении должны быть приложены усилия творческих и производственных коллективов и в первую очередь на расширение цветовой гаммы, разнообразия фактуры декоративно-акустических материалов, на обеспечение высокой степени механизации и автоматизации их производства, а также на совершенствование конструктивных решений декоративно-акустических покрытий.

17.3. Звукоизоляционные материалы

Основное назначение звукоизоляционных материалов — предотвращение распространения структурного звука в строительных конструкциях зданий. Затухание звуковой волны в таких материалах объясняется тем, что звуковая энергия, попадая в материал, расходуется главным образом на упругое деформирование элементов структуры этого материала. Поэтому звукоизоляционные материалы должны обладать определенными упругими свойствами, которые характеризуются относительным сжатием (K) и динамическим модулем упругости ($E_д$).

Наиболее эффективные звукоизоляционные материалы должны характеризоваться относительным сжатием при приложении к ним нагрузки 0,002 МПа не более 40%. По этому признаку все звукоизоляционные материалы разделяют на три группы: жесткие, с малой деформативностью ($K<5\%$); полужесткие, со средней деформативностью ($5\%\leqslant K\leqslant 15\%$); мягкие, с высокой деформативностью ($15\%\leqslant K\leqslant 40\%$).

По величине динамического модуля упругости звукоизоляционные материалы также разделяют на три группы: *1*-я ($E_д<1$ МПа); *2*-я (1 МПа$\leqslant E_д\leqslant$5 МПа); *3*-я (5 МПа$\leqslant E_д\leqslant$15 МПа).

Динамический модуль упругости является основной расчетной характеристикой, по которой определяют условия применения звукоизоляционных материалов в конструкциях ограждения зданий и сооружений. Звукоизоляционные материалы 1-й группы применяют в виде плит, рулонов, матов, уложенных сплошным слоем в конструкциях перекрытий с «плавающими» полами, многослойных перекрытий, а также стен и перегородок с целью улучшения изоляции от воздушного и ударного звуков. Звукоизоляционные материалы 2-й группы применяют в виде полосовых и штучных прокладок в конструкциях междуэтажных перекрытий с «плавающими» полами и в многослойных перекрытиях для улучшения изоляции от ударного звука. Звукоизоляционные материалы 3-й группы применяют в виде засыпок в многослойных конструкциях междуэтажных перекрытий для улучшения изоляции от ударного и воздушного звуков.

К звукоизоляционным материалам относят различные виды строительных материалов: цементный фибролит, древесно-волокнистые плиты, жесткие и полужесткие минераловатные плиты, плиты из стекловолокна, пористо губчатые виды пластмасс и резины, пористые зернистые материалы (керамзит, шунгизит, шлаковая пемза, шлак, прокаленный песок и др.).

В табл. 17.4 приведены основные свойства некоторых широко применяющихся звукоизоляционных материалов *.

Таблица 17.4. **Основные технические характеристики звукоизоляционных материалов**

Материал	Плотность, кг/м³	Динамический модуль упругости $E_д$, МПа, и относительное сжатие материала K при нагрузке, кПа					
		2		5		10	
		$E_д$	K	$E_д$	K	$E_д$	K
Плиты древесно-волокнистые	200 ... 250	1,0	0,1	1,1	0,1	1,2	0,15
Плиты теплоизоляционные из минеральной ваты ВФ-75 на синтетическом связующем:							
марка 80	70 ... 80	0,36	0,5	0,45	0,55	0,56	0,65
марка 100	90 ... 100	0,4	0,4	0,5	0,45	0,6	0,55
Шлак крупностью до 15 мм	500 ... 800	8	0,08	9	0,09	—	—
Песок прокаленный	1300 ... 1500	12	0,03	13	0,04	—	—

* Технология этих материалов достаточно полно освещена в соответствующих разделах данного учебника, а также в учебнике М. И. Рогового «Основы технологии искусственных пористых заполнителей и керамики».

ЧАСТЬ VII

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ В СТРОИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ

XXVII съезд КПСС, рассматривая Основные направления экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года, отметил чрезвычайную важность проблемы вовлечения в сферу производства полезного продукта вторичных материальных ресурсов и прежде всего промышленных отходов. Решение этой проблемы является одной из важнейших народнохозяйственных задач, ибо оно позволяет обеспечить промышленность и прежде всего строительный комплекс богатейшим источником дешевого и часто уже подготовленного сырья, создает реальные возможности экономии топлива, энергии, сокращения капиталовложений.

Особенно большой экономико-экологический эффект может быть получен при комплексном использовании природных ресурсов, когда наряду с основным производством полезного продукта организуется переработка отходов в полезный продукт другого назначения, т. е. при организации комплексных технологий.

Одним из перспективных направлений вовлечения отходов и побочных продуктов в промышленное производство является их использование для получения строительных материалов.

Стоимость строительных материалов составляет примерно 60% от сметной стоимости строительно-монтажных работ. Как показывает мировая практика, применение промышленных отходов позволяет на 10 ... 30% снизить затраты на изготовление строительных материалов по сравнению с использованием на эти цели природного сырья. А если учесть экологический эффект, то решение проблемы широкого вовлечения промышленных отходов в производство полезного продукта становится настоятельной необходимостью современности.

ГЛАВА 18

ПРОБЛЕМА ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ И ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Характерной особенностью научно-технического прогресса является ускоренное увеличение роста объема общественного производства. Рост народонаселения также предопределяет увеличение производства полезного продукта. Оба эти фактора привели к бурному развитию производительных сил, которое требует все большего вовлечения в хозяйственную деятельность природных ресурсов. При этом выработка большинства полезных ископаемых идет существенно быстрее, чем наращивание их разведанных запасов.

Весьма негативным моментом является то, что степень использования природных ресурсов остается пока еще на низком уровне. Увеличение их потребления неизбежно приводит к обеднению полезных ископаемых и, следовательно, к существенному увеличению доли отходов.

18.1. Проблема промышленных отходов

Ежегодно человечество перерабатывает примерно 10 млрд. т минеральных и столько же органических сырьевых продуктов. При этом от 20 до 99% сырья превращается в отходы, которые загрязняют атмосферу, водную среду, отчуждают земельные угодья, а в ряде случаев разрушают почвенный слой земли.

Можно привести множество примеров, подтверждающих приведенное выше положение дел. Так, в нашей стране только угольная промышленность ежегодно образует 1,3 млрд. т вскрышных и шахтных пород и около 80 млн. т отходов углеобогащения; в черной и цветной металлургии ежегодный выход шлаков достигает 83 млн. т; около 70 млн. т зол и шлаков образуют тепловые электростанции; древесных отходов ежегодно накапливается около 40 млн. м^3 и т. д.

К настоящему времени огромные количества промышленных отходов накоплены в различных отвалах: около 450 млн т шлаков черной и цветной металлургии, и их ежегодное пополнение составляет около 12 млн. т; в отвалах по добыче угля и руд хранится более 11 млрд. т отходов и также происходит их существенное ежегодное наращивание. Этот далеко не полный перечень отходов и их пополнения свидетельствуют о весьма неблагоприятном положении в вопросе комплексного использования сырья.

Вынужденное хранение огромного количества отходов, их удаление в отвалы приносят весьма ощутимые убытки народному хозяйству страны.

Так, зольные отвалы лишь одной крупной тепловой электростанции требуют для их хранения от 500 до 1000 га земли; ежегодные затраты лишь на удаление в отвалы отходов только угольной промышленности и электроэнергетики достигают 300 млн. руб. в год, а на организацию и содержание отвалов эти отрасли расходуют средства, составляющие 8 ... 10% стоимости добываемого угля, производимых электроэнергии и пара.

Всего же народное хозяйство из-за неиспользуемых возможностей вовлечения вторичного сырья и промышленных отходов в сферу производства полезного продукта несет урон, исчисляемый десятками миллиардов рублей.

Второй, не менее важной стороной вопроса является негативное влияние промышленных отходов на экологические факторы. Атмосфера катастрофически быстро загрязняется разнообразными выбросами промышленных предприятий. В нее выбрасываются газообразные и твердые продукты, образующиеся при сжигании топлива, протекании тех или иных технологических процессов. Для наглядности приведем некоторые примеры. Так, выброс сернистых газов при агломерации 1 т руды составляет 190 кг; 300 ... 320 м^3 коксового газа образуется при коксовании 1 т угля, из которых примерно 6%, или 20 м^3, поступает в атмосферу; 20 кг фтора попадает в атмосферу при получении 1 т алюминия; углеводороды, сероводород, оксиды азота, сернистый ангидрид, аммиак, хлористые соединения, пары стирола, фенола и другие вещества находятся в газовых выбросах химических производств. Общеизвестно, что такие вещества, как сероводород, кислоты, нитробензол, стирол, фенол и некоторые другие, являются токсичными. Сернистые газы, выброс в атмосферу которых предприятиями всех стран очень велик, уже сейчас образуют кислотные дожди, принося человечеству весьма серьезный ущерб.

Активными источниками загрязнения атмосферы являются тепловые электростанции, которые выбрасывают в нее сотни тонн золы и ежесуточно десятки тонн серного ангидрида.

Промышленность строительных материалов также является активным загрязнителем атмосферы. Наиболее серьезное загрязнение воздуха производится цементной промышленностью; лишь одна клинкерообжигательная печь за 1 ч выбрасывает в атмосферу до 100 кг пыли. Большое количество пыли попадает в атмосферу с карьеров камнедобычи и камнепиления, горнообогатительных комбинатов, из подготовительных цехов, в которых производятся помол и рассев сырьевых материалов.

Большие отходы, исчисляемые десятками миллионов тонн, образуются в карьерах по добыче и обогащению природного камня. Здесь в первую очередь следует отметить дисперсные отходы камнепиления, например, туфов, а также дробления и рассева вулканических кислых стекол (перлитового сырья). Эти тонкодисперсные продукты не только отрицательно влияют на условия работы в карьере, но и ухудшают экологическую обстановку в близлежащих районах.

Серьезный ущерб народному хозяйству наносится совершенно недостаточным вниманием к такому дорогостоящему продукту, каким является стеклобой. Ежегодно его отвалы пополняются не менее чем на 1 млн. т. Так как этот вид отходов не подвержен старению и разрушению, то его накопление приводит к необратимому загрязнению земли.

Промышленными отходами загрязняется и гидросфера, т. е. водная среда. Например, один целлюлозно-бумажный комбинат сбрасывает около 150 тыс. м^3 сточных вод в сутки, т. е. примерно столько же, сколько крупный промышленный город. В этих стоках содержится большое количество волокна и других трудноокисляемых органических веществ. Большую опасность представляют фенольные соединения, содержащиеся в сточных водах предприятий лесохимической, коксохимической, анилино-красочной промышленности, а также различных заводов химической обработки сельскохозяйственного сырья. В сточных водах ряда химических предприятий содержатся синтетические поверхностно-активные вещества, незначительное содержание которых вызывает образование стойкой пены и резко ухудшает биохимические свойства воды. Под влиянием промышленных отходов, сосредоточенных в отвалах, шлаконакопителях, хвостохранилищах и т. д., загрязняется поверхностный сток воды в районах их размещения.

Сброс промышленных отходов приводит в конечном счете к загрязнению вод Мирового океана, что существенно снижает его биологическую продуктивность и влияет на климат планеты.

Образование промышленных отходов, их хранение негативно сказываются и на качестве почвы. В ней накапливается избыточное количество губительно действующих на живые организмы соединений, в том числе канцерогенных. В результате этого в загрязненной «больной» почве идут процессы деградации, нарушается жизнедеятельность почвенных организмов, почва беднеет и теряет свои основные качества.

Таким образом, народное хозяйство при недостаточном внимании к промышленным отходам несет колоссальные убытки, а среда обитания живых организмов непрерывно и в некоторых случаях катастрофически ухудшается.

18.2. Перспективные пути решения проблемы промышленных отходов

Весьма полезными мероприятиями, снижающими экономико-экологический ущерб, определяющийся образованием промышленных отходов, являются: совершенствование технологии производства и строгое соблюдение всех технологических параметров производственных процессов; содержание промышленного оборудования в полной исправности; обезвреживание образующихся отходов; хранение отходов в специальных хранилищах, предотвращающих попадание вредных веществ в воздушную и водную среды.

Оснащение промышленных предприятий соответствующими эффективными очистными сооружениями имеет большое народнохозяйственное значение и стало теперь непреложным требованием.

Мировая практика свидетельствует об эффективности извлечения из промышленных отходов вредных веществ, отравляющих атмосферу и водный бассейн, для получения из них ценных химических продуктов. Например, создание энерготехнологических комплексов позволяет не только вырабатывать электроэнергию, но и получать такие вещества, как сульфат аммония, сернистый ангидрид. Последний, являясь одним из основных компонентов отхо-

дящих газов многих производств, во все возрастающем количестве используется для получения серной кислоты. На ряде металлургических предприятий путем применения технологии регенерации металлов осуществляют переработку шлаков, пеков, шламов. При этом практика показывает, что каждая тонна металла, полученного из отходов, в 2 ... 9 раз дешевле, чем тот же металл, но полученный путем переработки природного сырья (руд).

Наиболее эффективный путь решения проблемы промышленных отходов — создание и широкое применение безотходной технологии, т. е. технологии, базирующейся на системах с замкнутым циклом и обеспечивающей многократную (комплексную) переработку сырья с получением нескольких видов полезного продукта. При комплексном использовании сырьевых материалов промышленные отходы одних производств являются сырьем для других. Важность такого подхода к переработке природных сырьевых ресурсов следует рассматривать в нескольких аспектах. Во-первых, утилизация отходов позволяет решить задачи охраны окружающей среды, многократно сократить, а в ряде случаев совсем исключить накопление отходов в отвалах и различных хранилищах, устранить вредные выбросы в окружающую среду. Во-вторых, вовлечение промышленных отходов в производство полезного продукта в значительной степени покрывает потребность ряда перерабатывающих отраслей в сырье, причем во многих случаях в высококачественном, подвергнутом в процессе первичной переработки подготовке (диспергации, обжигу и т. п.). В то же время представляется возможным существенное сокращение потребления природного сырья. В-третьих, при комплексном использовании сырья снижаются удельные капитальные затраты и сокращается срок их окупаемости. Снижаются также непроизводительные расходы на основном производстве, связанные с удалением и хранением отходов, а вспомогательное производство практически полностью освобождается от транспортных расходов по доставке сырья.

Промышленность строительных материалов является потенциально безразличным потребителем большинства крупнотоннажных отходов черной и цветной металлургии, зол и шлаков электроэнергетики, гипсовых отходов химической промышленности, отходов углеобогащения, горелых и вскрышных пород, отходов камнедобычи, стеклобоя, других отходов и вторичных продуктов, которые могут и должны использоваться в качестве исходного сырья в этой материалоемкой отрасли. Уровень использования промышленных отходов в СССР хотя и является значительным, но к настоящему времени он явно недостаточен и намного ниже возможного.

Многие виды промышленных отходов по своему химико-минералогическому составу близки к природному сырью или применяющимся полуфабрикатам, а по химической активности превосходят их. Это позволяет в ряде случаев снизить энергоемкость производства или получать строительные материалы и изделия с улучшенными строительно-эксплуатационными свойствами.

Анализ накопленного отечественного и зарубежного опыта свидетельствует о высокой эффективности вовлечения в сферу производства строительных материалов подавляющего большинства крупнотоннажных отходов промышленности.

Все промышленные отходы можно разделить на две большие группы: минеральные (неорганические) и органические. Минеральные отходы имеют наибольшее значение, на их долю падает большая часть отходов, производимых добывающими и перерабатывающими отраслями промышленности. Эти отходы и в большей степени изучены.

П. И. Боженовым предложено классифицировать промышленные отходы на три класса: А — продукты, не утратившие природных свойств (карьерные остатки и остатки после обогащения на полезное ископаемое), имеющие химико-минералогический состав и свойства соответствующих горных пород; Б — искусственные продукты, полученные при переработке сырья в результате глубоких физико-химических процессов; В — продукты, образовавшиеся в результате длительного хранения отходов в отвалах. Эти три класса минеральных или органических отходов неоднозначны с точки зрения их применения в производстве строительных материалов в качестве сырья.

К продуктам класса А относят вскрышные породы, содержащие в достаточно большом количестве каменные горные породы, песок, глины и др.; остатки камнедобычи в виде щебня (гранитного, мраморного, туфового и пр.), в виде тонкодисперсных порошков, образующихся при камнепилении (туфов, мрамора), отходов горно-обогатительных комбинатов. Область применения этих отходов обусловлена агрегатным состоянием, химическим составом, гранулометрией материалов, физико-механическими свойствами. Преимущественно минеральные отходы класса А применяют в качестве заполнителей и наполнителей бетонов, а также как исходное глинистое, карбонатное, силикатное сырье для производства различных строительных материалов: керамики, извести, автоклавных материалов.

Продукты класса Б образуются как побочные продукты в результате физико-химических процессов, протекающих при обычных или чаще высоких температурах. Этот класс промышленных отходов характеризуется большим диапазоном возможного применения, чем отходы класса А. К таким продуктам в первую очередь относят металлургические шлаки, золы тепловых электростанций, отработанные катализаторы химической промышленности, шламы после переработки руд (например, алунита) и др. Эти материалы уже активизированы в процессе переработки основного сырья и представляют поэтому весьма ценное для промышленности строительных материалов сырье. Использование этих продуктов рационально прежде всего при производстве цементов, материалов автоклавного твердения, когда повышенная реакционная способность исходного сырья дает ощутимый экономический эффект. Например,

применение доменного шлака при производстве шлакопортландцемента позволяет почти в 2 раза снизить топливно-энергетические затраты на единицу продукции, а себестоимость уменьшить на 25 ... 30%. Перспективным направлением является применение шлаков и зол для получения сульфатно-шлаковых, известково-шлаковых, шлакощелочных вяжущих и строительных материалов на их основе. Весьма высока технико-экономическая эффективность получения бесклинкерных вяжущих, перечисленных выше, а также получаемых на основе стекловидных отходов, например «корольков», образующихся при производстве минеральной ваты, щелочного стеклобоя и т. п. Доменные шлаки и золы с успехом используют и для получения искусственных пористых заполнителей (аглопорита, зольного и глинозольного гравия), золы находят применение в производстве строительной керамики, ячеистых бетонов и др.

К весьма ценным продуктам, образующимся в химико-технологических производствах, относят фосфорные шлаки (шлаки электротермического производства фосфора), гипсосодержащие и железистые отходы (фосфогипс, борогипс, фосфополугидрат сульфата кальция, фторангидрит, кремнегипс, сульфогипс, пиритные огарки, колошниковую пыль — отход доменного производства, железистый шлам — отход производства анилина).

Потребность промышленности строительных материалов в гипсовом камне в настоящее время превышает 20 млн. т, а в ближайшем будущем достигнет 37 млн. т, на обеспечение чего потребуется значительный объем капиталовложений.

В то же время потребность в этом сырье практически полностью может быть удовлетворена за счет вовлечения в производство гипсосодержащих отходов. В 1980 г. в нашей стране ежегодный выход отходов и побочных продуктов, содержащих в основном сульфаты кальция, достиг примерно 20 млн. т. и продолжает увеличиваться. При этом основным продуктом является фосогипс — более 15,5 млн. т. В последнее десятилетие в ряде научно-производственных объединений, научно-исследовательских организаций и вузов разработаны эффективные способы переработки гипсосодержащих отходов в строительные материалы, большинство из которых широко внедрены в производство либо прошли промышленную проверку. Особенно широкие исследования проведены по использованию фосфогипса — самого многотоннажного продукта, содержащего сульфаты кальция. Как показывает практика, использование фосфогипса приносит существенный экономический эффект. Так, экономия приведенных народнохозяйственных затрат на 1 т продукции составляет в цементной промышленности в качестве минерализатора 1,93 руб., в качестве регулятора сроков схватывания цемента — 1,22 руб., в производстве высокопрочного гипса — 7,29 руб.

Установлена возможность переработки фосфогипса в белый цемент и серную кислоту (комплексное производство) при его неполной диссоциации и слабовосстановительной среде и в условиях нагревания до температуры 1200...1250°C. При этом экономия приве-

денных затрат на 1 т продукции составляет 6,4 руб. При отсутствии карбонатных пород из фосфогипса возможно получение серной кислоты и извести с экономическим эффектом около 7 руб. на 1 т.

Возможны и другие эффективные пути использования этого продукта, например в качестве добавки при производстве красного кирпича для улучшения сушильных свойств сырца, как заменителя мела в шпаклевочных и других составах, в качестве основного сырья для производства высокопористых материалов и др.

Из железосодержащих отходов наиболее широко применяют пиритные огарки. В частности, их используют как корректирующую добавку при производстве портландцемента. Для этой цели пригодны также колошниковая пыль и железистый шлам.

Примеров эффективного использования отходов и побочных продуктов класса Б можно приводить множество. Это фосфорные шлаки, шлаки никелевого производства, органические отходы, образующиеся при переработке нефти, природного газа, каменного угля, и другие побочные продукты химического производства минерального и органического происхождения. Однако данный раздел учебника имеет целью наглядно показать важность проблемы промышленных отходов как в экологическом, так и в экономическом аспектах, на отдельных особо ярких примерах осветить огромные возможности по применению отходов в качестве сырья промышленности строительных материалов, тем самым привить интерес молодым специалистам к данной проблеме.

Технология переработки промышленных отходов более подробно будет освещена в гл. 19, посвященной их использованию для производства высокопористых (теплоизоляционных и акустических) материалов и изделий. Однако для более полного освещения проблемы следует подробно остановиться на ее экономических аспектах, от понимания которых зависит правильность выбора направления утилизации тех или иных промышленных отходов.

18.3. Выбор направления утилизации промышленных отходов

Одним из главных критериев при выборе направления утилизации промышленных отходов является достигаемый экономический эффект. В производстве строительных материалов экономический эффект от утилизации 1 т твердых отходов ($Э_{уд}$) рекомендуется определять по разности суммарных удельных приведенных затрат на изготовление строительных материалов из традиционного сырья и затрат на производство аналогичных материалов из отходов с учетом их хранения в отвалах, разработки отвалов и транспортирования к месту переработки:

$$Э_{уд} = \frac{n_1}{a}(C_1 + n_2C_2 - C_3) + E(K_1 + n_2K_2 - K_3), \qquad (18.1)$$

где n_1 — коэффициент, учитывающий долю затрат на данный вид материала в общих затратах на сырье и материалы в себестоимо-

сти смонтированной конструкции; a — удельный расход утилизируемого сырья на единицу продукции; C_1 и C_3 — себестоимость строительных материалов соответственно из традиционного и утилизированного сырья; $n_2=0,3...1,0$ — коэффициент, учитывающий частичную или полную ликвидацию отвалов при утилизации отходов; C_2 — ежегодные затраты на содержание отвалов и транспортировку отходов; $E_н=0,15$ — нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений; K_1 и K_3 — удельные капитальные вложения на производство строительных материалов соответственно из традиционного и утилизируемого сырья; K_2 — капитальные вложения на сооружение отвалов.

Удельный экономический эффект использования отходов тепловых электростанций при производстве некоторых видов строительных материалов приведен в табл. 18.1.

Таблица 18.1. **Удельный экономический эффект от использования отходов ТЭС (по Я. А. Рекитару)**

Область применения	Материалы	Удельный экономический эффект, руб/т золы	Степень утилизации золы и шлаков ТЭС, %
Стеновые материалы и изделия	Пористые заполнители (зольный гравий, аглопорит гравиеподобной формы), кирпич, блоки из золы или с зольной добавкой	7 ... 15	35 ... 40
Неорганические вяжущие	Известково-сланцевый цемент, золопортландцемент, известково-шлакозольный цемент	0,7 ... 3,2	15
Специальные бетоны	Активная зольная добавка к гидротехническому бетону, добавка к жаростойкому бетону, литые изделия	2,5 ... 10	20

Наиболее полный расчет экономического эффекта от утилизации достигается при учете дополнительного эффекта от снижения ущерба в биосфере ($\Delta У$). Он создается за счет того, что отпадает необходимость в площадях для складирования отходов $\Delta У_в$, а также за счет сокращения выбросов в воздушный и водный бассейны $\Delta У_б$:

$$\Delta У = \Delta У_в + \Delta У_б. \qquad (18.2)$$

Первое из этих слагаемых находят по формуле

$$\Delta У_в = Ц_к S_в / T_в, \qquad (18.3)$$

где $Ц_к$ — кадастровая цена 1 га земли, руб.; $S_в$ — территория, высвобождаемая от отходов, га; $T_в$ — время, в течение которого разрабатываются отвалы, годы.

Второе слагаемое определяет снижение ущерба сельскому, лесному, водному и другим хозяйствам.

Пользуясь этой методикой, можно легко определить рациональное направление использования того или иного отхода и в соответствии с этим организовывать производство на его основе наиболее эффективных строительных материалов.

ГЛАВА 19

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ НА ОСНОВЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

В предыдущей главе была показана важность проблемы промышленных отходов и приведены примеры эффективных путей вовлечения этих отходов в производство строительных материалов. Так как теплоизоляционные и акустические материалы являются разновидностью строительных материалов, то основные принципы эффективной утилизации промышленных отходов применимы и к ним.

Действительно, для производства высокопористых материалов ячеистой структуры используют те же вяжущие вещества, что и для плотных материалов, те же виды заполнителей и наполнителей, но включают в технологический процесс операции, необходимые для образования в материале большого объема воздушных пор, применяют различные приемы, повышающие физико-механические характеристики высокопористых систем. Поэтому вяжущие вещества, получаемые с применением промышленных отходов и побочных продуктов, в подавляющем большинстве можно использовать при производстве теплоизоляционных и акустических материалов и изделий преимущественно с ячеистой пористой структурой.

Эти виды изделий с волокнистой пористой структурой можно получать из отходов, химико-минералогический состав которых идентичен или близок к составу традиционного сырья. В этом случае в зависимости от гранулометрии минеральных промышленных отходов необходимо применение соответствующих плавильных агрегатов.

Эти же основные положения применимы и для получения материалов с зернистой и комбинированной пористыми структурами.

На нескольких примерах рассмотрим перспективные возможности получения теплоизоляционных и акустических материалов на основе промышленных отходов.

19.1. Пути утилизации промышленных отходов при получении высокопористых материалов и изделий

В решении проблемы промышленных отходов серьезное внимание уделяется гипсосодержащим продуктам и в первую очередь — фосфогипсу.

Фосфогипс — отход сернокислотной переработки апатитов или фосфоритов в фосфорную кислоту или концентрированные фосфорные удобрения. В нем содержится 92...95% двуводного гипса с механической примесью 1...1,5% пятиокида фосфора и некоторое количество других примесей. Этот продукт образуется в виде шлама влажностью 20...30% с высоким содержанием растворимых примесей.

При производстве фосфорной кислоты способом экстракции по полугидратной схеме образуется побочный продукт — фосфополугидрат сульфата кальция, в составе которого находится от 92 до 95% α—$CaSiO_4 \cdot 1{,}5\,H_2O$, т. е. основного компонента высокопрочного гипса. Однако наличие на поверхности кристаллов полугидрата пассивирующих пленок существенно снижает проявление им вяжущих свойств и требует вследствие этого специальной технологической обработки.

При обычной технологии вяжущие на основе фосфогипсовых отходов низкокачественны, что главным образом объясняется высокой водопотребностью фосфогипса, обусловленной большой пористостью полигидрата в исходном сырье. Эта водопотребность в 2 с лишним раза выше, чем строительного гипса. Отрицательное влияние на строительные свойства фосфогипса оказывают и содержащиеся в нем примеси. В таком виде для производства высокопористых материалов это вяжущее применять нельзя, так как снижение средней плотности и, следовательно, повышение функциональных свойств теплоизоляционных и акустических материалов ячеистой структуры лимитируются именно их прочностью, зависящей от плотности и прочности межпоровых перегородок.

Всесоюзным научно-исследовательским институтом строительных материалов разработана технология гипсовых вяжущих из гипсосодержащих отходов химической промышленности, по качеству и эффективности значительно превосходящих гипсовое вяжущее из природного сырья. Эта технология, основанная на применении непрерывной автоклавной обработки фосфогипса, позволяет получать высокопрочный гипс марок 300 и 400. В настоящее время промышленное производство этого вяжущего находится на стадии освоения.

Наличие высокопрочного гипса с приведенной выше марочностью открывает новые большие возможности для получения высококачественных материалов на основе пеногипсовых систем. К таким материалам прежде всего следует отнести декоративно-акустические изделия с ячеистой и комбинированной пористой структурой, технология которых освещена в гл. 17 данного учебника. При этом появляется возможность существенного повышения прочности межпоровых перегородок пеногипса и, как следствие, самих изделий, а также расширение диапазона их средней плотности и, что самое важное, в сторону ее уменьшения.

Вторым весьма перспективным и эффективным направлением применения гипса, получаемого из гипсосодержащих отходов химической промышленности, является получение на его основе пеносистем, предназначенных для звуко- и теплоизоляционных самонивелирующихся монолитных подготовок под плавающие полы. Технология устройства таких подготовок, разработанная в МИСИ им. В. В. Куйбышева, отличается простотой, высокой степенью механизации и большой производительностью. При замене строительного гипса высокопрочным существенно повышается надежность поризованных стяжек, появляются новые возможности устройства монолитных внутренних перегородок с повышенными акустическими свойствами.

Технология устройства звуко- и теплоизоляционных монолитных подготовок под полы, монолитных внутренних перегородок включает следующие основные технологические операции: приготовление пеногипсовой массы (см. гл. 17); транспортирование приготовленной пеномассы к месту ее укладки по пневмопроводу, в качестве которого может быть использован любой гибкий шланг с гладкой внутренней поверхностью; заливку пеномассы в конструкцию (опалубку).

Вводя регулирующие добавки, можно управлять процессами схватывания и твердения гипсового вяжущего, а применяя дисперсное армирование, например, диспергированным стекловолокном, повышать трещиностойкость пеногипсовых массивов.

Эта технология позволяет транспортировать пеногипсовые смеси на большие расстояния по вертикали и горизонтали, что весьма удобно в построечных условиях.

Отходы, образующиеся при добыче и обогащении природных кислых стекол (перлитовое сырье), а также бой искусственного стекла (тарного, оконного, зеркального, электроламповото и др.) являются весьма перспективным продуктом для получения высокопористых материалов. Для понимания вопроса рассмотрим теоретические аспекты придания вяжущих свойств природным и искусственным стеклам.

Как известно, стекловидное состояние практически любого минерального вещества является метастабильным, из которого это вещество стремится перейти в устойчивое кристаллическое состояние. Этот переход может осуществляться самопроизвольно (шлаковый распад) или при создании определенных условий.

Вулканические кислые стекла, в первую очередь перлитовые породы (см. гл. 9), как показали исследования, проведенные в МИСИ им. В. В. Куйбышева, находясь в тонкодисперсном состоянии, при определенных условиях проявляют достаточно сильные вяжущие свойства и способны омоноличивать конгломератные системы без присутствия в них традиционных вяжущих веществ. В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть причины и условия проявления этого их ценного свойства, использование которого позволяет в ряде случаев экономить такой ценный продукт, как цемент, в том числе и при получении высокопористых материалов.

В природе в результате метаморфизма вулканические стекла при сравнительно низких температурах и давлениях претерпевают изменения, сопровождающиеся их цеолитизацией. Этот процесс характеризуется тем, что в результате гидратации присутствующих в породе безводных минералов образуются гидраты — минералы группы цеолитов *. Процесс цеолитизации в природе протекает под действием термальных вод с pH>7...7,5, при давлении от 0,1 до 4 МПа и температуре 100...300°С. С увеличением содержания щелочей температура цеолитизации может существенно снижаться или ускоряться сам процесс

Параметры процесса цеолитизации, протекающего в природных условиях, вполне возможно воссоздать искусственно и, изменяя их в нужном направлении, регулировать скорость и полноту процесса.

Исследования показали, что в условиях автоклавной обработки тонкодиспергированные вулканические стекла, затворенные щелочными растворами, в большей или меньшей степени проявляют вяжущие свойства. Активность процесса гидратации и свойства получаемого искусственного камня зависят от ряда факторов. Во-первых, на активность природных стекол оказывают существенное влияние условия образования породы. Выявлено, что в качестве гидравлического вяжущего могут быть использованы природные вулканические стекла (отходы от добычи, измельчения и рассева) с содержанием активного кремнезема — стеклофазы не менее 70%. Поэтому наиболее целесообразно использование перлитовых пород эффузивного генезиса, залегающих в областях молодого кайнозойского вулканизма. Стекла же экструзивного генезиса и более раннего происхождения содержат меньше стеклофазы, они в большей степени закристаллизованы, поэтому менее активны.

Во-вторых, процесс минералообразования в гидротермальных условиях определяется термодинамическими факторами, в первую очередь температурой и давлением.

В-третьих, существенную роль на кинетику процесса и конечные свойства продукта оказывают pH среды и вещественный состав компонентов, создающий этот показатель, т. е. вид щелочной добавки.

В-четвертых, на кинетику процесса структурообразования и свойства получаемого материала очень большое влияние оказывает дисперсность вулканического стекла. Чем она выше, тем полнее и быстрее протекает процесс при прочих равных условиях.

В качестве щелочного компонента, вводящегося в воду затворения, могут быть использованы едкий натр, силикат натрия (жидкое стекло), алюминат натрия. Последний в достаточно больших количествах образуется в виде побочного продукта на ряде про-

* *Цеолиты* — алюмосиликаты, кристаллическая структура которых образована тетраэдрическими фрагментами SiO_4 и AlO_4, объединенными общими вершинами в трехмерный каркас, пронизанный плоскостями и каналами; в каналах находятся молекулы воды и катионы металлов. Цеолиты способны селективно выделять и вновь впитывать воду, а также обменивать катионы.

изводств. Что же касается подготовки вулканического стекла к применению, то она заключается в его диспергировании (помоле) до получения продукта в виде порошка с $S_у$=4000...4500 см²/г.

Автоклавная обработка отформованных изделий — наиболее ответственная технологическая операция, обеспечивающая протекание физико-химических процессов, полнота и направленность которых зависят от параметров этой операции, определяемых в основном видом примененного щелочного компонента.

Присутствие в воде затворения катионов щелочных металлов оказывает существенное влияние на процесс структурообразования: они поддерживают высокое значение pH среды, создавая условия для увеличения количества гидрогеля, участвуют в процессах катионо-обменных реакций в направлении образования более долговечных алюмосиликатных соединений.

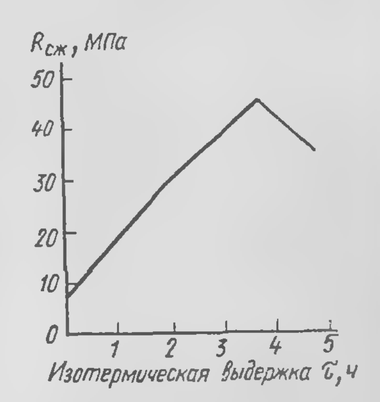


Рис. 19.1. Влияние продолжительности изотермической выдержки на прочность алюмосиликатного камня

В автоклаве в период изотермической выдержки происходит формирование структуры искусственного алюмосиликатного камня. При этом имеют место структурообразующие и деструктивные процессы. Последние ярко выражены при применении в качестве щелочной добавки технического едкого натра и связаны со следующими процессами.

В первый период изотермической выдержки протекают процессы гидролитической деструкции стекла с последующим образованием щелочных гидроалюмосиликатов, выделяющихся в виде гелеобразных масс. С течением времени продукты гидролиза превращаются в сростки кристаллов. В этот период наблюдается интенсивный рост прочности системы, который в основном обусловлен образованием и кристаллизацией высококремнеземистого цеолита — морденита ($Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 10SiO_2 \cdot 6H_2O$). Затем прочность алюмосиликатного камня падает (рис. 19.1) за счет образования в уже сформировавшейся структуре низкотемпературного кварца и возникающего при этом напряженного состояния. Это явление объясняется избытком в вулканическом стекле кремнезема, который не весь расходуется на образование щелочных алюмосиликатов. Поэтому продолжительность изотермической выдержки в этом случае следует ограничивать четырьмя часами (рис. 19.1) при давлении 1 МПа и шестью часами при давлении 0,8 МПа и строго следить за соблюдением этого параметра.

При использовании в качестве щелочной добавки жидкого стекла и особенно алюмината натрия деструктивные процессы выражены значительно слабее, а прочность получаемого камня существенно выше. Так, увеличение в системе Al_2O_3, вводимого в нее с алюми-

натом натрия, позволяет расширить область химических реакций, в результате чего синтезируется большее количество щелочных алюмосиликатов и снижается вероятность образования низкотемпературного кварца.

В общем виде новообразования, возникающие в рассматриваемых системах в процессе автоклавирования, представлены двумя фазами: аморфной и кристаллической. Изменение вида щелочного компонента влечет за собой изменение кинетики процессов структурообразования и состава новообразований. При применении едкого натра новообразования представлены в основном анальцимом и высококремеземистым цеолитом — морденитом. При использовании силиката натрия (жидкого стекла) основным синтезирующимся кристаллическим веществом является морденит. Введение в систему алюмината натрия изменяет соотношение между аморфной и кристаллической фазами в сторону увеличения рентгеноаморфного вещества. В этом случае кристаллическая часть образовавшегося камня представлена морденитом, содалитом и цеолитом состава $Na_2 \cdot Al_3 \cdot Si_5O_{16} \cdot 6H_2O$. Образующийся во всех рассмотренных случаях алюмосиликатный камень характеризуется показателями прочности, приведенными в табл. 19.1.

Таблица 19.1. Зависимость прочности при сжатии алюмосиликатного камня от вида щелочного компонента

Вид щелочного компонента	Количество щелочного компонента, % от массы перлита	Прочность при сжатии, МПа
Алюминат натрия	15	110
	10	80
Силикат натрия (жидкое стекло)	8	45
Технический едкий натр	8	35

Высокие прочностные показатели алюмосиликатного камня, особенно при применении алюмината натрия, открывают широкие возможности для получения высокопористых изделий из отходов, образующихся при добыче и обогащении перлитовых пород. Исследования, проведенные в МИСИ им. В. В. Куйбышева, выявили возможность получения теплоизоляционных плит плотностью 200...300 кг/м^2 и прочностью соответственно 0,7...1,2 МПа.

Наиболее эффективным способом получения таких изделий является способ сухой минерализации пены. В этом случае для первоначального закрепления образованной пористой структуры необходимо введение в состав смеси некоторого количества вяжущего, твердеющего в нормальных условиях. Эффективна, например, добавка строительного или высокопрочного гипса в количестве 7...10% от массы перлита.

Стеклобой также представляет большой интерес для получения высокопористых материалов. Этот вид промышленных отходов традиционно применяют (правда, далеко не в полной мере) для производства некоторых видов строительных материалов путем его плавления в составе стекольных шихт при получении оконного, тарного стекла, стекловолокна, ячеистого стекла, а также в качестве добавки при производстве строительной керамики или как заполнитель в бетонах.

В МИСИ им. В. В. Куйбышева разработана технология гранулированного пеностекла с насыпной плотностью 170...220 кг/м^3, которая также связана с применением высокотемпературной обработки и переводом стекла в пиропластическое состояние. В этом же институте в конце 80-х годов в результате проведенных исследований выявлены сильные вяжущие свойства искусственных щелочных стекол, что позволяет использовать стеклобой в качестве вяжущего для получения различных строительных материалов, в том числе и высокопористых.

Вяжущие свойства искусственных стекол, так же как и природных, проявляются в условиях автоклавной обработки в присутствии воды и щелочи. Так как в составе щелочного искусственного стекла уже присутствует щелочь в количестве, вполне достаточном для прохождения процессов, приводящих к образованию искусственного камня, то главной технологической задачей в этом случае является ее извлечение из стекла и перевод в раствор.

Обычно в щелочных стеклах содержится от 8 до 16% щелочи. Для решения главной технологической задачи достаточно диспергировать стеклобой путем его помола и затем, приготовив из него концентрированную водную суспензию ($В/Т=0{,}07...0{,}1$), подвергнуть автоклавной обработке при избыточном давлении 0,6...1,0 МПа.

Структурообразование искусственного камня в этом случае идет следующим образом. Из тонкодиспергированных частиц стекла ($S_у > 3500$ см^2/г) в условиях гидробаротермальной обработки щелочь переходит в раствор и повышает pH среды до 9,5...11,5. Процесс выщелачивания стекла начинается уже в период подъема давления при температуре выше 100°С. По мере увеличения значений pH воды в период изотермической выдержки активизируется процесс пептизации кремнезема стекла, его растворения с образованием кремниевой кислоты. С ростом концентрации последней начинается процесс ее поликонденсации. Параллельно с этим происходит образование нерастворимого высокомодульного силиката натрия. Все это приводит к омоноличиванию системы за счет образования искусственного камня, сложенного в основном рентгеноаморфным веществом и характеризующегося высокой механической прочностью до 50...70 МПа. При наличии в стекле Al_2O_3 или при введении его в состав смеси кроме перечисленных продуктов реакции образуются щелочные алюмосиликаты, еще в большей степени упрочняющее синтезируемый материал.

Характерной особенностью мелкозернистых материалов на стекольном вяжущем является их высокая прочность при изгибе, составляющая 3...4-ую часть от прочности при сжатии. Так, мелкозернистый материал состава 1 : 3 (стекольный порошок : кварцевый пе-

сок) характеризуется прочностью при сжатии 60 МПа, а при изгибе 17...19 МПа.

Высокие прочностные характеристики такой системы позволяют применять ее для получения эффективных теплоизоляционных материалов. В этом случае основной технологической задачей является закрепление полученной пористой структуры до автоклавной обработки изделий. Проведенные исследования свидетельствуют о возможности получения высокопористых материалов несколькими способами с использованием различных составов исходных масс, обеспечивающих закрепление пористой структуры в нормальных условиях (перед автоклавной обработкой). Применяют вспучивание сырьевой смеси с помощью газообразующих добавок (алюминиевой пудры), пенообразование с использованием способа сухой минерализации пены или газопенную технологию. Наиболее приемлемым способом, позволяющим получать изделия в широком диапазоне плотностей, является способ сухой минерализации пены. В этом случае закрепление полученной пористой структуры можно осуществлять введением в смесь 9...11% гипса от массы твердых компонентов или применять цементосодержащие смеси, в которых роль кремнеземистого компонента выполняет стекольный порошок. По сравнению с обычным ячеистым бетоном расход цемента может быть снижен на 45...50%.

Основные свойства теплоизоляционных материалов с применением стекольного порошка, полученных способом сухой минерализации пены, приведены в табл. 19.2.

Таблица 19.2. Основные свойства пеноматериала на основе стекольного порошка

Вид компонентов смеси	Показатели свойств			
	$\rho_{ср}$, кг/м³	$R_{сж}$, МПа	$R_{изг}$, МПа	λ, Вт/(м·°C)
Стекольный порошок, гипс	450	2,8 ... 3,0	0,7 ... 0,74	0,091
	500	3,3 ... 3,6	0,83 ... 0,9	0,11
	600	5,0 ... 5,5	1,3 ... 1,5	0,125
Стекольный порошок, портландцемент	350	1,1 ... 1,2	0,27 ... 0,35	0,075
	400	1,6 ... 1,7	0,40 ... 0,43	0,95
	500	2,8 ... 3,0	0,6 ... 0,67	0,12

Следует отметить, что автоклавные материалы на основе природных и искусственных стекол отличаются повышенной коррозионной стойкостью и водостойкостью, их коэффициент размягчения при насыщении водой близок к единице.

Из стекловидных отходов хорошими вяжущими свойствами обладают «корольки» и просыпь, образующиеся при производстве минеральной ваты. Использование этих продуктов — повторное, особенно в вагранках, весьма затруднительно из-за ухудшения аэродинамики печей. В то же время, как показали исследования, проведенные в МИСИ им. В. В. Куйбышева, тонкодиспергированные отходы минераловатного производства ($S_{уд}$ > 3500 см²/г), затворенные слабым раствором щелочей проявляют сильные вяжущие свойства как при автоклавировании ($R_{сж}$ до 120 МПа), так и при пропаривании ($R_{сж}$ до 70 МПа). На основе этого вяжущего можно получать различные строительные материалы с высокими показателями строительно-эксплуатационных свойств, например плиты для промышленных полов, тротуарные плиты, бордюрный камень, а также высокопористые материалы по описанной выше технологии. В этой связи возникают предпосылки для организации безотходной переработки сырья на минераловатных заводах.

Золы ТЭС используют в промышленности строительных материалов в качестве кремнеземистого компонента при производстве ячеистых бетонов, эффективного глиняного кирпича, зольного аглопоритового гравия и других материалов. Однако их использование совершенно недостаточно и составляет лишь несколько процентов от ежегодного объема золообразования. Поэтому весьма актуальной задачей является поиск новых эффективных путей вовлечения зол ТЭС в производство полезного продукта.

В 70-е годы в МИСИ им. В. В. Куйбышева были проведены исследования, в результате которых определена новая возможность эффективного использования зол ТЭС.

Важнейшими свойствами отходов, определяющими метод их переработки, являются химический состав, физико-химические, токсикологические, пожаро- и взрывоопасные характеристики. В ряде случаев промышленные отходы характеризуются неоднородностью состава и свойств. Например, химический состав золы при сжигании углей может колебаться в довольно широких пределах. В золе Донецкого угольного бассейна содержание отдельных оксидов колеблется в следующих пределах, % по массе: SiO_2 — 32...56; Al_2O_3 — 12...27; Fe_2O_3 — 6...22; CaO — 1,4...12; MgO — 0,9...4,3.

Золы Кузнецкого и Экибастузского бассейнов более стабильны и отличаются повышенным содержанием кислых оксидов (38...42% — Al_2O_3 и 45...51% — SiO_2, остальное — примеси: CaO, MgO, Fe_2O_3 и т. д.). Эти золы, судя по содержанию оксидов алюминия и кремния, являются тугоплавкими и могут быть использованы для получения жаростойкой ваты. Исследования, проведенные в МИСИ им. В. В. Куйбышева в 1973—1977 гг., подтвердили это предположение. Из этих зол, а также из зол Подмосковного бассейна в электродуговой печи была получена золовата, характеризующаяся следующими показателями основных свойств: $\rho_{ср}$ = 75...90 кг/м³; λ = 0,04...0,052 Вт/(м·°C); температура применения при длительной эксплуатации 950...980°C.

Организация производства такой золоваты позволяет частично заменить дорогостоящую и дефицитную муллитокремнеземистую вату, получаемую из химически чистого сырья. Себестоимость золоваты на 40...60% ниже муллитокремнеземистой.

Наиболее рационально организовать производство золоваты непосредственно на ТЭС или вблизи от них, имея в виду, что, во-первых, ТЭС являются потенциальным потребителем такой продук-

ции и, во-вторых, электроэнергия непосредственно на ТЭС существенно дешевле, чем при передаче ее на значительные расстояния (из-за практически отсутствия потерь). Для такой организации производства необходимо проведение мероприятий, важнейшим из которых является организация в основном сухого золоудаления.

Древесные отходы составляют до 50% всей массы перерабатываемой древесины, большая часть из них сжигается либо вывозится в отвалы. Однако, как показали исследования, предприятия строительных материалов могут эффективно использовать эти отходы практически полностью. Например, в настоящее время сложились следующие основные направления утилизации лигнина — одного из наиболее емких отходов лесохимии: как топливно-выгорающей добавки в производстве пористого кирпича, заменителя опилок в строительных изделиях, сырья для получения феноллигниновых полимеров, пластификатора и т. п.

При использовании лигнина в качестве выгорающей добавки достигается двойной эффект: поризация керамической массы и, как следствие, получение эффективного кирпича, а также использование его как дополнительного топлива.

Введение лигнина в шихту для получения аглопорита позволяет на 150...180 кг/м^3 снизить среднюю плотность аглопорита и тем самым улучшить его теплоизоляционные свойства, на 20...25% уменьшить расход угля и одновременно повысить коэффициент конструктивного качества получаемого продукта.

Лигнин можно использовать вместо формальдегида при производстве полимеров фенолоформальдегидного типа, в виде жидких резольных и твердых новолачных смол, что представляет большой практический интерес, в том числе для получения пенопластов.

Отходы древесины, как известно, являются хорошим сырьем для получения ряда строительных материалов с применением минеральных (цемента, извести, гипса) и органических (синтетических смол) вяжущих. Средняя плотность таких материалов, как фибролит, древесно-волокнистые и древесно-стружечные плиты, ксилолит, колеблется в пределах 250...800 кг/м^3, т. е. измельченные соответствующим образом отходы древесины являются хорошим сырьем для получения теплоизоляционных, акустических и конструкционно-теплоизоляционных материалов и изделий.

Приведенные примеры использования отходов промышленности для получения полезного продукта отражают лишь небольшую часть имеющихся возможностей. Однако они иллюстрируют перспективность такого подхода к решению проблемы промышленных отходов, их утилизации в системе строительного комплекса и улучшения экологии среды.

В заключение следует подчеркнуть чрезвычайную важность и необходимость проведения научных исследований и практических работ в направлении всемерного и широкого использования промышленных отходов для получения полезного продукта, экономии природных ресурсов и охраны окружающей среды.

ЧАСТЬ VIII

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПУТИ ОПТИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ И ОБЩЕСТРОИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Методологической основой курса является создание высокопористых структур теплоизоляционных и акустических материалов и изделий. Эта основа подчеркивает общность технологических задач при их получении, однако не раскрывает особенностей пористой структуры тех и других материалов, позволяющих регулировать их функциональные свойства при использовании различного сырья и методов его переработки в высокопористые материалы и изделия, предназначенные для достижения разных целей.

ГЛАВА 20

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ И ОБЩЕСТРОИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Оптимизация функциональных и общестроительных свойств рассматриваемых материалов и изделий, как, впрочем, любых строительных материалов и изделий, не может быть достигнута без учета конкретных условий их службы, определяющих требования к материалам с позиций технической и экономической эффективности выполненных из этих материалов конструкций.

Действительно, требования к теплоизоляционным материалам (к их свойствам, структуре), предназначенным для службы в обычных условиях, в условиях низких температур и при высоких температурах, существенно отличаются. Поэтому оптимизация их функциональных свойств и достижение наиболее высоких технико-экономических показателей должны планироваться с обязательным учетом условий эксплуатации конструкций.

20.1. Методологические принципы оптимизации строительной теплоизоляции

В гл. 1 рассмотрена эффективность строительной тепловой изоляции с учетом экономического фактора на примере фибролита и пенополистирола. Показано, что несмотря на то, что 1 м^3 пено-

полистирола в деле почти в 2 раза дороже фибролита, его удельная стоимость $S_{уд}$ в ограждении существенно ниже.

Рассмотрим этот вопрос несколько шире — на примере большего числа теплоизоляционных материалов. В табл. 20.1 приведены данные об этих материалах с учетом их средней стоимости и теплопроводности в деле (в конструкции).

Таблица 20.1. **Удельная стоимость ($S_{уд}=K_{огр}\lambda$) основных видов теплоизоляционных материалов**

Вид материала	λ, Вт/(м·°С), в деле	Стоимость 1 м³ в конструкции, руб.	$S_{уд}$
Цементный фибролит	0,098	19,2	1,88
Ячеистый бетон	0,116	19,5	2,26
Минераловатные плиты на связующем:			
битумном	0,06	32	1,92
синтетическом	0,05	38	1,90
Торфяные плиты	0,063	52	3,28
Плиты пенополистирольные	0,035	32	1,12
Плиты на основе резольных формальдегидных смол	0,038	56	2,13
Пенополиуретаны (на отечественном сырье)	0,03	188	5,64

Анализ данных, приведенных в табл. 20.1, позволяет судить о целесообразности развития производства и применения тех или иных теплоизоляционных материалов, а также о направленности исследований с целью повышения эффективности этих материалов.

Совершенно очевидно, например, что теплоизоляционные свойства ячеистых бетонов необходимо улучшать путем снижения их средней плотности и улучшения пористой структуры.

Минераловатные плиты на синтетическое связующем характеризуются довольно высокой стоимостью в деле, что также должно явиться предметом исследований, направленных на оптимизацию технологии изделий, повышение их качества и снижение трудозатрат при устройстве тепловой изоляции конструкций.

Пенополистирольные пенопласты отличаются наиболее высокой технико-экономической эффективностью, поэтому их производство существенно наращивается. Но и здесь есть важные задачи, требующие решения. Это прежде всего снижение горючести материала.

Высокие функциональные и общестроительные свойства пенополиуретанов делают этот материал весьма перспективным. Однако высокая стоимость сырья существенно понижает его эффективность. Следовательно, в этом случае задача состоит в нахождении нового подхода к технологии полиуретана, обеспечивающего резкое снижение стоимости полимера. Предпосылки к этому имеются. Так, примерно 40% пенополиуретановых изделий промышленность производит на импортном сырье, при этом стоимость изделий почти на 70 руб. ниже, чем на отечественном.

Торфяные теплоизоляционные плиты к эффективным материалам отнести нельзя. Поэтому их производят и применяют главным образом в районах, богатых торфом, т. е. по существу они являются местным теплоизоляционным материалом.

Таким образом, основными принципами оптимизации производства и применения теплоизоляционных материалов в строительстве являются: выбор теплоизоляционного материала, наиболее эффективного для использования его в данной строительной конструкции (стеновых панелях, плитах покрытий и др.); учет климатических условий региона и эксплуатационной стойкости теплоизоляционного материала в этих условиях; технико-экономические характеристики материала в данной строительной конструкции.

При этом всегда следует стремиться к использованию теплоизоляционных материалов, обладающих наиболее высокими функциональными свойствами (в данном случае — низкой теплопроводностью).

Высокие функциональные свойства теплоизоляционной конструкции можно обеспечить лишь в случае надежной защиты теплоизоляционного материала от увлажнения. Кроме того, подавляющее большинство этих материалов снижает свои строительно-эксплуатационные свойства при увлажнении, особенно при циклических воздействиях влаги (увлажнение — высушивание). Очень важным моментом является учет отношения материала к действию огня, особенно при строительстве пожароопасных зданий и помещений.

20.2. Методологические принципы оптимизации высокотемпературной теплоизоляции

Несколько другой подход должен быть к оптимизации функциональных свойств теплоизоляционных материалов и конструкций при тепловой изоляции горячих поверхностей оборудования и трубопроводов. В данном случае хотя и действует общая закономерность снижения теплопроводности за счет повышения пористости материала и уменьшения размера пор, однако в силу увеличения доли конвективного и лучистого видов теплопередачи оптимизация функциональных свойств тепловой изоляции имеет свои специфические особенности.

На рис. 20.1 приведены результаты исследования теплопроводности муллитокремнеземистой ваты и изделий на ее основе в зависимости от их средней плотности и температуры. Анализируя кривые, можно выявить следующие закономерности: для каждой температуры существует оптимальное значение средней плотности материала, при котором он характеризуется наиболее низкой теплопроводностью; по мере снижения значений рабочей температуры оптимум средней плотности материала смещается влево, т. е. в сторону меньших значений этого показателя. Поэтому, оптимизируя теплопроводность, необходимо вести расчет по заданной температуре и в

зависимости от ее значений принимать среднюю плотность теплоизоляционного материала.

Отраженная на графике закономерность характерна для всех жаростойких теплоизоляционных материалов, однако абсолютные значения λ от $\rho_{ср}$ и температуры для каждого материала будут различными, зависящими от многих факторов: фазового состояния (кристаллическое, стекловидное) и минералогического состава твердой фазы, вида и характеристик пористой структуры. Следовательно, для получения наибольшего эффекта от применения теплоизоляционного материала необходимы точные сведения о его свойствах.

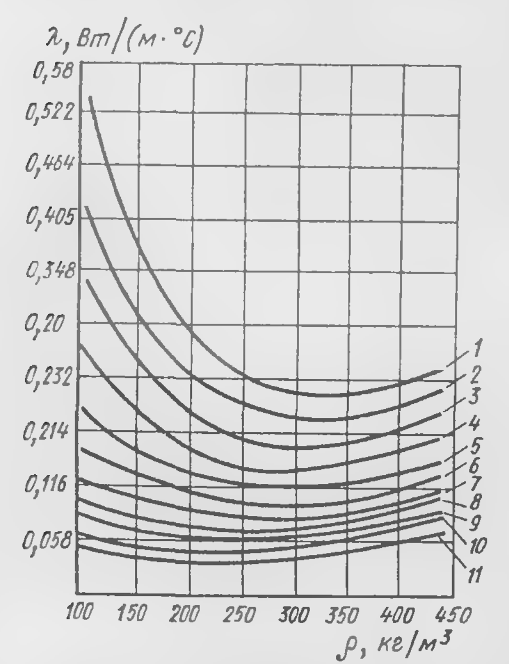


Рис. 20.1. Теплопроводность муллитокремнеземистой ваты в зависимости от средней плотности при температурах, °С:

1 — 1000; 2 — 900; 3 — 800; 4 — 700; 5 — 600; 6 — 500; 7 — 400; 8 — 300; 9 — 200; 10 — 100; 11—30

При тепловой изоляции горячих поверхностей трубопроводов теплопроводность материала играет решающую роль. Напомним, что $Q=\lambda/\delta F\Delta t$, т. е. количество теплоты, проходящее через материал толщиной δ, прямо пропорционально площади F. Увеличивая толщину теплоизоляционного слоя на трубопроводе, мы увеличиваем и площадь теплоотдачи F. Может случиться так, что, невзирая на увеличение термического сопротивления материала, теплопотери через теплоизоляцию возрастут за счет прироста площади F.

Следовательно, тепловая изоляция горячих криволинейных поверхностей (трубопроводов, цилиндрических и шарообразных емкостей) должна выполняться из высокоэффективных теплоизоляционных материалов, характеризующихся низкой теплопроводностью — до 0,06 Вт/(м·°С). Только в этом случае теплоизоляционная конструкция будет иметь высокие функциональные свойства и обеспечивать экономию теплоты. При этом чем меньше диаметр трубопровода (чем больше кривизна поверхности), тем больше прирост площади наружной поверхности теплоизоляции при увеличении толщины теплоизоляционного слоя, тем меньшей теплопроводностью должен характеризоваться материал.

Второй весьма важной характеристикой, определяющей уровень функциональных свойств жаростойких теплоизоляционных материалов, является теплоемкость. Чем ниже теплоемкость ограждающих конструкций тепловых агрегатов, тем меньше требуется теплоты и времени на их разогрев до рабочей температуры и тем меньшей тепловой инерцией они характеризуются. Последний фактор очень важен для создания легкорегулируемых тепловых режимов в тепловом агрегате, имеющих часто решающее значение для правильного проведения того или иного пиропроцесса. Как известно, количество теплоты, необходимое для нагревания материала, прямо пропорционально удельной теплоемкости данного материала и его массе. Поэтому, снижая массу ограждения теплового агрегата, можно уменьшать его теплоемкость. Следовательно, для снижения теплоемкости тепловых агрегатов весьма эффективно применять легкие жаростойкие материалы. Особенно эффективно использование для этих целей жаростойких волокон и материалов на их основе.

Технико-экономическая сторона задачи по оптимизации высокотемпературной теплоизоляции неразрывно связана с термической стойкостью и температуростойкостью жаростойких высокопористых материалов — свойствами, определяющими их продолжительность службы. Здесь следует выделить два аспекта: межремонтный период работы тепловых агрегатов и сбережение ценного, как правило, дефицитного и дорогостоящего огнеупорного сырья. Увеличение межремонтного периода неразрывно связано с повышением производительности теплового агрегата, снижением себестоимости выпускаемой продукции и сбережением материальных ресурсов.

Таким образом, основные принципы оптимизации тепловой изоляции горячих поверхностей оборудования и трубопроводов можно сформулировать следующим образом. Для достижения наиболее высокого технико-экономического эффекта необходимо: функциональные свойства применяемого теплоизоляционного материала (теплопроводность, теплоемкость, термо- и температуростойкость) строго сочетать с параметрами работы теплового агрегата (рабочей температурой, периодичностью нагревания и охлаждения, агрессивностью среды) и конструктивными особенностями горячих поверхностей.

Мировая практика свидетельствует о высокой эффективности жаростойких волокон и материалов на их основе. В связи с этим в нашей стране и за рубежом волокнистые жаростойкие материалы находят все большее применение, вытесняя традиционные огнеупорные изделия с ячеистой структурой. Таким образом, основными методологическими принципами оптимизации функциональных свойств теплоизоляционных материалов и технико-экономических факторов их производства и применения являются основные закономерности получения высокопористых материалов с заданной пористой структурой и свойствами, наиболее полно отвечающими требованиям эксплуатации в данной теплоизоляционной конструкции.

Функциональные свойства и технико-экономические факторы производства и применения *акустических (звукопоглощающих и звукоизоляционных)* материалов и изделий методологически следует рассматривать с позиций наилучшего сочетания функциональных свойств материалов, зависящих от их пористого строения, условий эксплуатации (характеристик шума) и технико-экономических показателей, учитывающих затраты на производство материала и его установку в конструкцию. Иными словами, пористая структура материала и сама конструкция, предназначенная для поглощения или предотвращения распространения звука, должны создаваться целенаправленно, для конкретных условий с целью достижения максимального эффекта по гашению шума при минимально возможных затратах.

Здесь следует отметить, что подавляющее большинство звукопоглощающих материалов и изделий должно выполнять еще и декоративные функции. Поэтому основными задачами при получении таких материалов и изделий являются: целенаправленное формирование их пористой структуры и придание лицевым поверхностям разнообразных форм и декоративных фактур с целью обеспечения возможности создания многообразия внутренних интерьеров в различных помещениях общественных, административных и других зданий.

ГЛАВА 21

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ИХ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ

Качество теплоизоляционных и акустических материалов и изделий, определяемое комплексом функциональных и общестроительных свойств, решающим образом зависит от их пористой структуры: общей пористости, равномерности ее распределения, размеров пор, характера их внутренней поверхности, замкнутости, толщины, плотности и прочности межпоровых перегородок, прочности клеевых контактов, вида пористой структуры.

В гл. 5 учебника достаточно подробно рассмотрены пути формирования оптимальной пористой структуры для всех известных видов пористости: ячеистой, волокнистой, зернистой, а в гл. 6 — возможности получения (способы) высокопористых структур рассматриваемых материалов и изделий при применении различного сырья.

Анализируя эти главы, можно сделать следующие обобщения для теплоизоляционных материалов и изделий:

а) во всех случаях (при получении всех видов пористой структуры) повышение дисперсности каркасообразующих элементов позволяет снижать среднюю плотность материалов, увеличивать содержание в них газовой фазы, повышать равномерность ее распределения и дисперсность, а следовательно, улучшать теплоизоляционные свойства материалов;

б) применение полидисперсных частиц твердой фазы позволяет при создании ячеистых пористых структур получать более плотные и прочные межпоровые перегородки, что является резервом для дальнейшего снижения средней плотности материалов с позиций их прочностных свойств;

в) важнейшее влияние на формирование пористых структур материалов (с любым видом пористости), а также на их прочностные характеристики оказывают реологические свойства формовочных масс и связующих композиций (при получении волокнистых и зернистых материалов и изделий), поэтому оптимизация реологических свойств перерабатываемых систем является одним из основных условий повышения качества высокопористых материалов;

г) повышение значения водосодержания формовочных масс или пониженные концентрации полимерных композиций всегда приводят к снижению плотности межпоровых перегородок и клеевых пленок, омоноличивающих волокнистые или зернистые каркасообразующие элементы, что негативно влияет на прочностные показатели материалов, увеличивает их сорбционную влажность и, как следствие, ухудшает теплоизолирующую способность.

Рассматривая эти положения с технико-экономических позиций, можно констатировать следующее. Повышение дисперсности каркасообразующих элементов всегда требует увеличения энергозатрат, которые, как правило, с лихвой окупаются за счет снижения материалоемкости (снижения средней плотности изделий), уменьшения расхода теплоты, необходимой на тепловую обработку изделий, за счет снижения их массы.

Кроме того, в сфере применения снижение массы конструкций существенно влияет на удельный расход строительных материалов, стоимость которых в общем балансе затрат в строительстве составляет 40...60%. Необходимо учитывать и такой долговременный позитивный фактор, как повышение термического сопротивления строительных конструкций, достигаемое за счет применения более эффективных строительных материалов и обеспечивающее снижение затрат топливно-энергетических ресурсов на отопление зданий;

д) снижение исходного водосодержания формовочных масс, достигаемое за счет применения эффективных технологических приемов регулирования их реологических свойств или принципиально новых технологий, является одним из основных путей экономии технологического топлива, расходуемого на тепловую обработку изделий.

Анализ отечественного и зарубежного опыта в области получения высокопористых материалов свидетельствует о перспективности применения технологических приемов, позволяющих сочетать различные способы порообразования с целью повышения общей пористости материалов и управления ее характеристиками. Например, газопенная технология, термобаротермальный способ в сочетании с

химическим газообразованием при получении теплоизоляционных и акустических материалов с ячеистой пористостью, сочетание способа создания волокнистых структур со способом выгорающих добавок при получении керамо-волокнистых жаростойких материалов и, особенно монолитных футеровок методом самоуплотнения формовочных масс и др.

Весьма перспективным направлением следует считать получение материалов с комбинированными пористыми структурами: зернисто-волокнистой, зернисто-ячеистой, волокнисто-ячеистой и др.

Зернисто-волокнистая структура весьма эффективна для звукопоглощающих материалов типа «Акмигран», когда межзерновая пористость, образованная минераловатными гранулами, сочетается с волокнистой пористостью самих гранул. Такое сочетание существенно улучшает звукопоглощение материала в широком диапазоне частот звуковых волн.

Зернисто-ячеистая пористость особенно эффективна при получении композиционных материалов, например, наполненных пенопластов. В этом случае введение в пенопласты легких пористых заполнителей (вспученного перлита, особо легкого керамзита и др.) позволяет существенно повысить прочностные характеристики пенопластов и понизить их горючесть. Наибольший эффект достигается в случае соизмеримости средней плотности зерен заполнителя и пенопласта. Таким суперлегким заполнителем является стеклопор или его более дисперсная разновидность — силипор.

В СССР наиболее широко развито производство и применение минераловатных теплоизоляционных материалов. Объем их выпуска достигает 55% от общего объема теплоизоляционных материалов, изготовляемых промышленностью. Поэтому, говоря о перспективных теплоизоляционных материалах для строительства, следует в первую очередь иметь в виду материалы на основе минеральной ваты.

В последние годы ряд научно-исследовательских институтов и вузов уделяют большое внимание минераловатному производству (ВНИИПИТеплопроект, ВНИИТеплоизоляция, УралНИИстромпроект, МИСИ им. В. В. Куйбышева и др.). Работы этих организаций позволили наладить выпуск эффективных минераловатных изделий: плит повышенной жесткости с различно ориентированной волокнистой структурой, армированных и упрочненных изделий и др.

В настоящее время ставится еще более сложная задача — получение высококачественных минераловатных изделий по энергосберегающей безотходной технологии, не оказывающей вредного влияния на окружающую среду.

В качестве примера такого подхода к производству минераловатных изделий можно привести совместную работу МИСИ им. В. В. Куйбышева и Белгородского комбината строительных конструкций Минтяжстроя СССР по созданию поточной технологической линии минераловатных плит повышенного качества. Отличительной особенностью этой линии является наличие замкнутой системы утилизации теплоты и фенолоспиртового связующего, содержащихся в отходящих газах, ранее выбрасываемых в атмосферу. В результате создания такой технологической линии резко улучшены санитарные условия в производственных помещениях, исключен выброс в атмосферу паров фенола и наряду с этим на 15...16% сокращен удельный расход дефицитного связующего, а себестоимость изделий снижена с 40,59 руб. до 34,93 руб.; прочностные показатели ($R_{сж}$) повышены с 0,06...0,09 до 0,1...0,11 МПа при средней плотности плит 215...240 кг/м^3. Прочностные показатели изделий при снижении удельного расхода связующего повышены главным образом за счет увеличения степени отверждения фенолоспиртов, достигаемой применением более рациональных режимов тепловой обработки.

Применение вибрационной обработки на стадиях приготовления и укладки формовочных смесей (гидромасс) создает благоприятные условия для улучшения волокнистой структуры плит, облегчения обезвоживания формовочных масс, повышения степени отверждения связующего и, как следствие, является весьма эффективным приемом для повышения качества продукции без заметного ее удорожания.

Особенно эффективна вибрация в сочетании с подогревом, который можно осуществлять за счет утилизации теплоты отходящих газов. Такой опыт в отечественной промышленности имеется, поэтому главной задачей на современном этапе является его широкое распространение.

Весьма перспективной является технология рулонного материала из стекловолокна, названного «стекломехом». Отличительной особенностью этой технологии является получение материала с очень низкой средней плотностью, что предопределяет малый расход сырьевых материалов и ставит эту технологию в ряд ресурсосберегающих.

Средняя плотность стекломеха не превышает 10 кг/м^3; масса 1 м^2 теплоизоляции из этого материала при ее толщине 5 см находится в пределах 350...450 г; теплопроводность стекломеха в сухом состоянии составляет 0,05...0,055 Вт/(м·°С), коэффициент звукопоглощения — 0,65, а прочность при разрыве — 1 МПа. Материал упруг, характеризуется хорошей формостабильностью, удобен в работе, значительно меньше ранит кожу, чем минераловатные изделия, практически не пылит.

Стекломех выпускают в рулонах длиной до 30 м, шириной 0,8...1,5 м и толщиной 5 см. Изделия площадью 25 м^2 сворачиваются в рулон диаметром всего 40 см и могут транспортироваться без специальной упаковки. После раскатывания рулона изделие полностью восстанавливает свои первоначальные размеры.

Сырьевыми материалами для получения стекломеха являются: стекловолокно и в качестве связующего синтетические смолы (фенолоформальдегидная, карбамидная, поливинилацетатная) или композиции на основе отходов целлюлозоварения (см. ниже).

Для производства 1 м³ стекломеха расход материалов составляет 4,5 ... 8,5 кг стекловолокна и 1,2 ... 1,5 кг связующего. Именно это обстоятельство определяет эффективность данной технологии и делает ее чрезвычайно перспективной.

Технологический процесс изготовления стекломеха прост и заключается в следующем. Стекольный расплав, истекающий из фидера ванной печи через керамическую фильеру, вытягивается в непрерывное волокно, наматываясь на вращающийся барабан, который одновременно совершает возвратно-поступательные перемещения с различной заданной частотой. Изменением частоты и скорости возвратно-поступательного движения барабана регулируется плотность укладки стекловолокна на барабан. С целью увеличения упругости стекловолокна и упрочнения изделия во время намотки стекловолокна на барабан оно опрыскивается раствором связующего.

По достижении заданной толщины намотки она разрезается по образующей, снимается с барабана и растягивается на специальном приспособлении. В результате образуется ковер из стекловолокна с более плотной укладкой волокон с нижней стороны, которая играет роль упрочняющего слоя. Такая структура ковра обеспечивается изменением скорости возвратно-поступательного движения барабана и, следовательно, изменением плотности укладки волокон.

Применение стекломеха при устройстве тепловой изоляции позволяет достигать большой экономии материальных и трудовых ресурсов. Особенно он эффективен при теплоизоляции трубопроводов горячего и холодного водоснабжения при канальной прокладке внешних сетей, разводке трубопроводов внутри зданий, изоляции вентиляционных систем и систем кондиционирования. Стекломех может с успехом применяться в качестве утеплителя в многослойных стеновых панелях различной конструкции, а также в холодильниках, в рефрижераторах и различных транспортных средствах. При обеспечении хорошей пароизоляции стекломех можно использовать в качестве подвесной теплоизоляции (с внутренней стороны) покрытий промышленных зданий.

В гл. 19 рассмотрена эффективность применения жаростойких волокон и изделий на их основе промышленной тепловой изоляции. Однако существенные затраты в сфере производства этих материалов, необходимость использования дефицитного и зачастую химически чистого дорогостоящего сырья сдерживают широкое производство и применение жаростойких волокнистых теплоизоляционных материалов. Следует отметить также, что ряд отраслей народного хозяйства остро нуждается в эффективной тепловой изоляции с рабочей температурой до 1000°С. Это прежде всего электроэнергетика, нефтехимия, промышленность строительных материалов и др.

В этой связи создание высокоэффективных волокнистых материалов из недефицитного сырья и отходов производства является важной задачей, решение которой даст народному хозяйству страны существенный технико-экономический эффект.

В СССР имеются достаточно полные разработки по использованию зол тепловых электростанций для получения жаростойкой золоваты (см. гл. 19). В настоящее время задача состоит в стабилизации зол как сырья для получения золоваты и организации промышленного производства этого весьма эффективного жаростойкого теплоизоляционного материала.

Весьма перспективным направлением следует признать повышение температуроустойчивости обычной минеральной ваты, получаемой из горных пород и промышленных отходов, например металлургических шлаков. Успешное решение этой задачи позволит применять для получения жаростойких волокнистых материалов распространенное относительно дешевое сырье, что само по себе является весьма важным вопросом, влияющим на экономику отраслей промышленности, использующих в своей технологии высокие температуры. В этом направлении весьма интересные исследования проведены во ВНИИПИТеплопроекте.

Известно, что температуроустойчивость минеральной ваты определяется температурой спекания волокон и температурой растекловывания. Значения этих температур зависят от многих факторов: химико-минералогического состава шихты, условий получения расплава, режимов нагревания и охлаждения волокон и др.

Обычно температура спекания минераловатных волокон в зависимости от применяемого сырья находится в пределах 700...800°С, поэтому температура применения минеральной ваты не превышает 600...700°С. Расстекловывание же (нерегулируемое кристаллообразование), могущее привести к полной потере прочности и разрушению волокон, начинается уже при температуре 500°С и протекает во времени. Оно характеризуется кристаллообразованием, как правило, неравномерным, которое предопределяет возникновение напряженного состояния и при образовании крупных кристаллов, расположенных неравномерно по сечению волокна, это напряжение становится критическим и является причиной потери прочности волокном или его полного разрушения. Поэтому длительная служба минераловатных изделий при температуре начала растекловывания практически невозможна.

С другой стороны, известны искусственно полученные стеклокристаллические материалы, свойства которых существенно выше, чем стекловидных того же химико-минералогического состава. Поэтому одним из направлений повышения температуроустойчивости стекловидных минеральных волокон является их направленная кристаллизация, обеспечивающая создание более устойчивой к температурному воздействию мелкокристаллической структуры. Именно решению этой задачи посвящена работа ВНИИПИТеплопроекта, являющаяся еще одним шагом в развитии производства жаростойких волокон и изделий на их основе.

В процессе выполнения работы удалось установить взаимозависимости ряда технологических параметров, которые решающим образом влияют на свойства кристаллизующихся волокон.

Во-первых, состав шихты должен обеспечивать получение кристаллизующихся волокон, т. е. расплав и стекло должны обладать высокой кристаллизационной способностью. Во-вторых, образующаяся кристаллическая структура должна быть равномерной, сложенной из мелких кристаллов, а процесс кристаллообразования должен характеризоваться равнозначной интенсивностью в объеме волокна.

Для обеспечения этих условий необходимо получение расплава с высокой степенью гомогенности и создание в стекле (в волокнах) большого количества равномерно распределенных центров кристаллизации. В этом случае возможно получение закристаллизованных волокон, устойчивых при эксплуатации в условиях высоких температур и характеризующихся удовлетворительной прочностью. При этом максимальная температура применения таких волокон или изделий из них будет обусловливаться минералогическим составом кристаллической фазы.

ВНИИПИТеплопроектом разработана технология кристаллизующихся волокон, получаемых из расплавов горных пород габбро-базальтовой группы, доломитов, магнезита или мартеновских шлаков. Разработанные составы шихт приведены в табл. 21.1.

Таблица 21.1. Составы шихт для получения жаростойких кристаллизующихся волокон

Компоненты шихты	Содержание компонентов, % по массе		
Габбро-базальтовое сырье	75 ... 90	85 ... 95	50 ... 70
Доломит	10 ... 25	—	—
Магнезит	—	5 ... 15	—
Мартеновские шлаки	—	—	30 ... 50

Высокое содержание в сырье MgO, FeO, MnO предопределяет высокий коэффициент кристаллизационной способности (K_c) расплавов и стекол из таких шихт:

$$K_c = \frac{MgO + FeO}{CaO} \geqslant 1. \quad (21.1)$$

В минералогическом отношении шихта содержит шпинельно-пироксеновую фазу, позволяющую получать при создании определенных условий мелкокристаллическую структуру волокон.

Технологический процесс изготовления прошивных матов из жаростойких кристаллизующихся волокон организуется по следующей технологической схеме:

Подготовка и загрузка сырья в плавильный агрегат
↓
Получение расплава в плавильном агрегате
↓
Переработка расплава в волокно
↓
Формирование ковра в камере волокноосаждения
↓
Изготовление прошивных матов
↓
Термообработка прошивных матов в электропечи
↓
Охлаждение изделий
↓
Съем и упаковка готовой продукции

Отличительными особенностями этой технологии являются следующие основополагающие положения.

Для получения однородного расплава плавильный агрегат следует выбирать с учетом применяемого сырья, исходя из следующих обстоятельств:

а) для повышения гомогенности расплава необходимо применять мелкозернистое сырье, особенно его тугоплавкую часть;

б) модуль кислотности шихт для получения кристаллизующихся минеральных волокон, обеспечивающий оптимальную вязкость расплава при температуре варки стекла 1350...1400°С, должен быть не менее 1,9, при этом необходимо выдерживать соотношение $\frac{MgO + FeO}{CaO} = 1 \cdots 3$, что обеспечивает высокую кристаллизационную способность расплава и стекла;

в) при превалирующем содержании в шихте Fe_2O_3, который восстанавливается интенсивнее, чем FeO, процесс плавления следует вести в слабоокислительной среде, а при большем содержании FeO — в нейтральной;

г) в случае применения карбонатных пород (добавок) или сырьевых материалов, в состав которых входят минералы, содержащие кристаллитную воду, необходимо увеличить время плавления для достижения полной дегазации расплава, так как в данном случае этот процесс будет более продолжительным;

д) скорость процесса силикато- и стеклообразования обусловливается минералогическим составом шихты, поэтому процесс плавления необходимо вести с учетом повышенного содержания в шихте минералов, медленно растворяющихся в расплаве, к которым относятся кварц, оливин, мелилит, и неполное растворение которых неизбежно снизит гомогенность расплава;

е) температурный режим процесса плавления приведенных в табл. 21.1 составов шихт характеризуется следующими превраще-

ниями сырья: при температуре 1230...1260°С начинается процесс плавления (появляется жидкая фаза), а при 1350...1370°С расплав характеризуется жидкотекучим состоянием и не содержит твердой фазы.

Операции по переработке расплава в волокно, формированию ковра и изготовлению прошивных матов осуществляются обычными способами.

Весьма ответственной операцией является термообработка изделий, которая должна обеспечить предкристаллизационную перестройку структуры стекла и образование в нем центров кристаллизации. При этом следует учитывать возможность оплавления волокон, поэтому температура термообработки минераловатных изделий не должна превышать допустимые пределы. Как показали исследования, для рассматриваемых составов шихт изложенные выше требования обеспечиваются при температуре 700...750°С.

После термообработки при повышении температуры (во время эксплуатации материала) идет быстрое кристаллообразование, в результате которого волокна из метастабильной (стекловидной) фазы переходят в более устойчивую кристаллическую фазу, сложенную в основном из мелких кристаллов шпинелидно-пироксенового состава, характеризующихся весьма высокой стабильностью.

При определении режима термообработки необходимо принимать во внимание следующие обстоятельства.

Во-первых, минеральное волокно вследствие малого диаметра не испытывает заметных температурных напряжений, т. е. температурный градиент по его толщине практически отсутствует. Поэтому нагрев изделий может осуществляться методом термоудара — введением обрабатываемого материала сразу же зону максимальных температур. Такой прием существенно сокращает продолжительность термообработки.

Во-вторых, продолжительность выдержки волокон при максимальной температуре должна обеспечить предкристаллизационную перестройку структуры стекла и образование многочисленных центров кристаллизации во всем объеме волокна. Здесь решающую роль играет фазовый состав стекла. Для пироксеновых* стекол характерна генетическая взаимосвязь между процессами, протекающими в ряду шихта — расплав — стекло — кристалл, что обеспечивает весьма быстрое образование кристаллической фазы. Уже через 5...7 мин выдержки при температуре 700°С в волокнах возникают микрокристаллы. При термической обработке минераловатных матов продолжительность выдержки, обеспечивающая прогрев ковра по всей толщине, должна составлять 20...25 мин.

Скорость охлаждения матов регламентируется их толщиной и процессом предкристаллизационной перестройки стекла, которая завершается при снижении температуры до 300...400°С. На практике

* *Пироксены* группа минералов подкласса цепочечных силикатов, $R_2(Si_2O_6)$, где R — Li, Na, Ca, Mg, Fe, Al, и др.

продолжительность охлаждения ковра составляет примерно 30... 35 мин.

Таким образом, целью термообработки минераловатных волокон является обеспечение предкристаллизационной перестройки стекла, после достижения которой волокна закристаллизовываются при их повторном нагреве до 1000°С (в процессе службы) с образованием мелкокристаллической шпинелидно-пироксеновой фазы. В данном случае роль центров кристаллизации играют шпинелидные ядра.

Известно, что рост кристаллов под воздействием высоких температур происходит во времени и может явиться причиной разрушения волокон. Поэтому главной задачей является выбор составов шихт, обеспечивающих образование мелких кристаллов и ограничение свободы их роста. Ограничение свободы роста кристаллов обеспечивает остаточная стеклофаза, которая располагается в виде пленок между кристаллами и служит «буфером», способствующим релаксации возникающих при росте кристаллов напряжений. Как правило, в термоустойчивых стеклокристаллических волокнах доля стеклофазы составляет 10...15%.

Для получения стеклокристаллических волокон с мелкими кристаллами (0,5...0,2 мкм) химические составы исходных шихт должны приближаться к составу проектируемой кристаллической фазы (например, шпинелидно-пироксеновой), но не должны точно соответствовать ее стехиометрическому составу. Именно такой подход к проектированию исходных составов шихт обеспечивает наличие в закристаллизованных волокнах остаточной стеклофазы, ограничивающей или предотвращающей рост кристаллов во времени и обеспечивающей омоноличивание образовавшейся мелкокристаллической фазы.

Для предотвращения роста кристаллов в волокнах под воздействием высоких температур в состав исходных шихт вводят добавки, замедляющие эти процессы.

Термообработку прошивных матов наиболее целесообразно осуществлять в конвейерных электропечах типа леров с высокотемпературной зоной и зоной принудительного охлаждения.

Маты из кристаллизующихся волокон характеризуются средней плотностью 130...150 кг/м³. Следует отметить, что процесс кристаллизации волокон минеральной ваты сопровождается их уплотнением и усадкой, а также определенной потерей прочности. Поэтому усадка прошивных матов после их нагрева до температуры 1000°С составляет 5%, а после термообработки — 2...3%. Это обстоятельство необходимо учитывать при устройстве теплоизоляционной конструкции. Прочность минераловатных волокон после термообработки составляет 70% от первоначальной, а после нагрева до рабочей температуры (до 800...1000°С) еще снижается соответственно до 60... 50%, что, однако, вполне достаточно для обеспечения сохранности изделий в период эксплуатации.

Приведенные выше технологические принципы повышения температуры службы минераловатных изделий весьма перспективны и

заслуживают расширения исследований в направлении их дальнейшего совершенствования.

Задача заключается в проведении систематических исследований по выявлению наилучших составов шихт, параметров изготовления волокон, их термической обработки с целью получения устойчивых мелкокристаллических структур, нахождения более действенных средств, препятствующих росту кристаллов во времени под воздействием высоких (рабочих) температур.

Перспективным направлением следует также считать получение жестких жаростойких изделий на основе этих волокон, что существенно расширит область их применения и позволит уменьшить дефицит эффективных волокнистых теплоизоляционных и конструкционно-теплоизоляционных изделий, применяющихся в диапазоне температур 800...1000°C.

К этому следует прибавить технико-экономические соображения. Развитие производства кристаллизующихся волокон и изделий на их основе может существенно расширить сырьевую базу для получения волокнистых жаростойких материалов, сократить расход дефицитного и дорогостоящего сырья, значительно снизить стоимость эффективных теплоизоляционных изделий, применение которых в современном печестроении непрерывно расширяется.

На этом примере достаточно четко иллюстрируется значение технологических путей повышения эффективности производства и применения теплоизоляционных материалов за счет улучшения их функциональных свойств (в данном случае долговечности, лимитирующейся температуроустойчивостью), а также увеличения температуры службы.

В Советском Союзе получило широкое развитие производство вспученного перлита — весьма ценного полуфабриката для изготовления эффективных теплоизоляционных изделий. Однако производство изделий осуществляется пока в масштабах, не соответствующих имеющимся возможностям. Для ликвидации такого положения необходимо создание новых способов переработки этого ценного полуфабриката в эффективные теплоизоляционные и акустические изделия.

Главной задаче в решении этой проблемы является создание эффективных и дешевых связующих веществ, позволяющих омоноличивать зерна вспученного перлитового песка и без существенного увеличения средней плотности придавать изделиям необходимую прочность.

При создании таких связующих веществ наибольший интерес представляет использование отходов и побочных продуктов промышленности, так как в этом случае кроме технико-экономического эффекта может быть достигнут экологический эффект.

Перспективность технологических решений в этом направлении можно проиллюстрировать двумя примерами.

Коллективами ЦНИИЭПсельстроя, ВНИПИТеплопроекта и МИСИ им. В. В. Куйбышева разработана технология перлитовых изделий на связующем, основу которого составляют многотоннажные отходы производства целлюлозы сульфитным способом — сульфитный щелок и попутный продукт его переработки на спирт или дрожжи — сульфитно-дрожжевая бражка (СДБ). Основными составляющими этих продуктов являются лигносульфоновые кислоты и их растворимые соли. Подавляющая часть этих веществ не находит широкого применения и либо подвергается дорогостоящей нейтрализации перед сбросом в реки и водоемы, либо сжигается.

Товарная сульфитно-дрожжевая бражка выпускается в виде водного раствора 40...65%-ной концентрации и является нефондируемым продуктом.

Выбор лигносульфоновых кислот и их растворимых солей в качестве основы для связующего продиктован не только доступностью сырья (хотя это и очень важно), но и их качественным составом.

Основным структурным элементом этих веществ является бензольное кольцо с присоединенными к нему реакционноспособными радикалами. Это дает основание считать, что свойства связующего могут быть приближены к свойствам хорошо известных, но дефицитных и дорогостоящих фенолоформальдегидных смол.

На основании исследований предложен наиболее рациональный состав связующего, включающий следующие компоненты, % по массе:

Лигносульфоновые кислоты и (или) их водорастворимые соли (СДБ)	65,36
Ортофосфорная кислота	16
Фенолоформальдегидная смола (фенолоспирты)	13,7
Органосиликонаты щелочных металлов (ГКЖ — 10,11)	5

Сущность данного технологического решения состоит в том, что входящая в состав композиции фосфорная кислота при тепловой обработке (175...240°C) взаимодействует с макрофрагментами лигносульфоновых кислот и их солей, а также с фенолоспиртами с образованием сшитых полимеров, нерастворимых в воде. Входящая в состав связующего ГКЖ придает изделиям на этом связующем гидрофобность.

Технология перлитовых теплоизоляционных изделий на основе данного связующего, названных «Лигноперлитом», включает в себя следующие основные операции: приготовление водного раствора связующего; приготовление формовочной смеси; формование изделий; тепловую обработку изделий.

Связующее приготавливают в смесителе принудительного действия с вертикальным расположением вала с частотой вращения 60...120 $мин^{-1}$. Загрузка компонентов связующего в смеситель должна производиться в строгой последовательности. Вначале в смеситель с работающей мешалкой подают ГКЖ, затем фенолоспирты; перемешивание ведут 0,5...1,5 мин с момента начала загрузки фенолоспиртов. После этого загружают 15...20% СДБ от общего ее количества; смесь перемешивают 1...2 мин с момента подачи СДБ, после

чего добавляют остальное количество СДБ, продолжая перемешивание еще в течение 2...5 мин. Затем в смеситель подают ортофосфорную кислоту и необходимое количество воды и перемешивают композицию еще 2...5 мин с момента начала подачи кислоты. Таким образом, процесс приготовления связующего сложности не представляет и продолжается всего 6...14 мин.

Формовочную смесь приготавливают в лопастном смесителе в течение 5...6 мин. Формование осуществляют на гидравлическом прессе обычным для перлитовых изделий способом.

Тепловую обработку изделий производят на поддонах в сушильных камерах туннельного типа способом противотока по режиму: начальная температура 110°С, максимальная — 200...220°С. Продолжительность тепловой обработки 6...9 ч. После охлаждения изделия упаковывают и складируют.

Изделия, получившие название лигноперлитов, характеризуются следующими показателями: средняя плотность — 200, 250 и 300 кг/м^3; прочность при сжатии соответственно 0,45; 0,5 и 0,7 МПа; прочность при изгибе — 0,25; 0,35 и 0,45 МПа; теплопроводность при температуре 25°С — 0,055; 0,062 и 0,07 Вт/(м·°С).

Лигноперлит может быть применен в качестве утеплителя в многослойных стеновых панелях, при устройстве мягкой кровли, в том числе по металлическому профилированному настилу, а также в качестве декоративно-акустического материала.

Вторым весьма перспективным технологическим решением получения высококачественных изделий из вспученного перлита является разработанная МИСИ им. В. В. Куйбышева технология, отличительной особенностью которой является отсутствие в формовочной массе связующего. Для получения изделий, названных термоперлитом, используется двухкомпонентная смесь, состоящая из вспученного перлитового песка и раствора едкого натра технического или щелочесодержащих отходов с R_2O не менее 50%, например отходов электрохимической очистки стали от окалины, содержащих до 75% едкой щелочи, и др.

Технология термоперлита включает следующие основные операции: смешивание вспученного перлитового песка с щелочесодержащим раствором; формование изделий на гидравлическом прессе и термическую обработку готовых изделий.

Наиболее ответственной операцией является термическая обработка изделий, которая проводится при температуре 500...550°С в течение 1,5...2,5 ч в зависимости от толщины выпускаемых изделий. Наиболее рациональным тепловым аппаратом для этой операции является лер — конвейерная печь, широко применяющаяся в стекольном производстве.

Во время тепловой обработки происходят контактное спекание зерен перлита и омоноличивание всей системы. Снижение температуры спекания до 500°С объясняется наличием в системе плавня, которым является едкая щелочь. В зоне охлаждения образовавшиеся контакты упрочняются и обеспечивают достаточно высокую

прочность получаемых изделий. Технологический процесс организуется по конвейерной схеме и отличается простотой. На 1 м^3 изделий расходуется 1,7...2 м^3 перлитового песка с насыпной плотностью до 100 кг/м^3 и 12 кг едкого натра в пересчете на NaOH.

Термоперлит характеризуется следующими показателями основных свойств:

средняя плотность — 150...220 кг/м^3;

прочность, МПа: при сжатии — 0,4...0,7, при изгибе — 0,25...0,45;

теплопроводность, Вт/(м·°С): при 25°С — 0,057...0,065, при 300°С — 0,103; температура применения — до 600°С.

Высокие физико-механические свойства термоперлита, простота изготовления изделий, малокомпонентность формовочной смеси и возможность использования промышленных отходов (щелочесодержащих продуктов) позволяют считать эту технологию весьма перспективной. Термоперлит по своим свойствам пригоден для широкого применения в строительной и промышленной тепловой изоляции.

Еще одна важная проблема ждет своего решения. Развитие производства ячеистых бетонов в нашей стране незаслуженно замедлилось и, что еще прискорбнее, наблюдается некоторое снижение объема выпуска этого материала. В то же время мировая практика выявила высокую техническую и экономическую эффективность ячеистых бетонов. Поэтому объем производства и области применения ячеистых бетонов в отечественном строительстве могут и должны быть существенно увеличены.

Исторически сложилось так, что основной объем выпуска теплоизоляционных ячеистых бетонов приходится на газобетон и газосиликат, доля же пенобетона составляет немногим более 2% от общего объема выпуска этого вида теплоизоляционных изделий.

Сложившееся положение объясняется рядом причин, главнейшей из которых является то, что в период промышленного развития технологии ячеистых бетонов (50—60-е годы) промышленность не производила высокоэффективных стандартных и стабильных синтетических пенообразователей. Применение же природных органических пенообразователей не было эффективным, так как не имело достаточной сырьевой базы, а получаемые из них технические пены отличались короткой жизнеспособностью, нестабильностью и «отравляющим» воздействием на цементы. Поэтому в настоящее время объем исследований в области технологии пенобетона весьма ограничен. Выпуск этого материала ежегодно снижается из-за несовершенства технологии и худших по сравнению с газобетоном показателей свойств, особенно по средней плотности и, следовательно, теплопроводности.

По данным ВНИИТеплоизоляции за 1986 г., средние показатели плотности выпускаемого теплоизоляционного газобетона составили 379 кг/м^3, а пенобетона — 492 кг/м^3. Это означает, что при производстве пенобетона почти на 30% расходуется больше сырьевых материалов, соответственно с этим возрастают затраты теплоэнер-

гетических ресурсов, что существенно снижает рентабельность технической оснащенности заводов пенобетона, на которых главное технологическое оборудование, предназначенное для приготовления пеномасс, безнадежно устарело и не может отвечать современным техническим требованиям.

С другой стороны, газобетонной технологии присущи существенные недостатки, устранение которых весьма проблематично. Во-первых, это низкая устойчивость поризованной массы на стадии вспучивания и вызревания, а также большая зависимость технологических операций поризации смесей и закрепления пористой структуры от теплового режима процессов. Во-вторых, большая дефектность пористой структуры, выражающаяся в наличии контактных дырок в стенках пор и разрыхлении поверхности стенок пор в результате прорыва газа через перегородки, что является следствием разности давления газа в порах различного диаметра; наличие трещин в стенках пор из-за разности кинетики вспучивания центра и периферии изделий, где имеет место пристенный эффект. В-третьих, сложность стабильного поддержания на заданном уровне плотности (пористости) изделий в силу высокой чувствительности газовыделения и газоудержания от многих факторов технологического процесса, особенно при получении легких изделий.

Применение вибрационной и ударной технологии, а также газопенного способа поризации масс, основанного на трехстадийном насыщении сырьевой смеси газовой фазой, использование песка с прерывистой гранулометрией в определенной мере ослабили негативные стороны традиционной технологии газобетонов, но не устранили их совсем. Необходимо добавить, что для газобетонной технологии свойственна ограниченность сырьевой базы из-за трудностей использования вяжущих и смесей, отличающихся кислой средой или высокой скоростью твердения (гипсовые вяжущие, ГЦПВ и др.). Кроме того, в газобетонные смеси невозможно вводить подавляющее большинство неметаллических волокнистых армирующих материалов, так как они разлагаются в щелочной среде.

Указанные недостатки отсутствуют при пеновом способе поризации строительных материалов. В этом случае формирование ячеистой структуры происходит в условиях пониженного поверхностного натяжения растворов, обусловленных наличием в смесях поверхностно-активных веществ — пенообразователей. Введенный в такую смесь воздух диспергирован на примерно равные объемы и окружен припоровым слоем, обогащенным ПАВ. Пониженное поверхностное натяжение, повышенная вязкость и механическая прочность этого слоя, отсутствие заметной разности давления в порах, динамические воздействия в процессе поризации смеси (перемешивание) обеспечивают выполнение одного из главных принципов термодинамической устойчивости системы - создание наименьших поверхностей на границе раздела газ — дисперсионная среда. Поэтому в материалах, полученных способом пенообразования, пористая структура лучше, чем в материалах, полученных газовым вспучиванием: поры имеют меньший размер и однородно распределены в объеме изделия, отсутствуют контактные дырки и трещины на межпоровых перегородках, а внутренняя поверхность пор всегда гладкая и плотная. Последнее обстоятельство существенно снижает концентрацию напряжений в материале при его нагружении, что обеспечивает получение изделий с повышенной прочностью.

При всех этих преимуществах пеновый способ поризации смесей располагает широкими возможностями направленного регулирования объема пористости и характеристик пористой структуры материала, в частности, создания полифракционных пор. Достигается это регулированием содержания ПАВ в растворе и гидродинамических условий перемешивания (изменение скорости вращения смесительного вала, площади поверхности лопастей смесителя и ее формы, применение мешалок с несколькими смесительными валами, вращающимися с различной скоростью, и др.).

Выпускаемые в настоящее время синтетические пенообразователи (их различные виды) можно применять как в щелочных, так и в кислых средах, что существенно расширит сырьевую базу для ячеистых бетонов.

Необходимо, однако, отметить, что способ пенообразования не лишен недостатков. Во-первых, во время совмещения технической пены с водной суспензией минеральных компонентов происходит частичное механическое разрушение пены. Для предотвращения этого используют минеральные смеси с высоким водотвердым отношением и пены с высокой кратностью. Оба эти приема не только не рациональны, но и вредны, ибо ухудшают качество готового материала и приводят к перерасходу материальных и топливно-энергетических ресурсов. Во-вторых, ранее применявшиеся пенообразователи, получение которых основано на использовании природных продуктов, незначительно снижают поверхностное натяжение воды (с 73,9 до 50...60 Н/м), «отравляют» гидравлические минеральные вяжущие, что влечет за собой недобор прочности материалом. Такие пены характеризуются нестабильностью свойств, коротким периодом жизнеспособности; сырьевая база для их производства весьма ограничена. Все это привело к ослаблению интереса широкого применения способа пенообразования для получения высокопористых строительных материалов.

Новые результаты исследований и технологические решения последних лет, прошедшие широкую промышленную проверку, позволяют полностью преодолеть недостатки, присущие традиционной пеновой технологии высокопористых строительных материалов.

Использование в качестве пенообразователей синтетических поверхностно-активных веществ — продуктов нефтехимического синтеза (см. гл. 6) позволяет в 2,5...2,8 раза снизить поверхностное натяжение воды (до 27...30 Н/м), что предопределяет их значительную пенообразующую способность и стабильность получаемых пен. Эти свойства обеспечивают существенное снижение расхода синте-

тических ПАВ при получении пенобетонов и, как следствие, отсутствие «отравляющего» действия на вяжущие или значительное ослабление этого действия.

Значительным шагом в совершенствовании технологии пенобетонов является разработанный в МИСИ им. В. В. Куйбышева принципиально новый метод поризации минеральных водных суспензий для получения пеноматериалов различного назначения.

Новая технология, названная способом сухой минерализации пены, рассмотренная на примере получения пеногипсовых изделий в гл. 17, предусматривает поризацию смесей методом сухой минерализации пены; использование пен разной кратности; направленное регулирование структуры пеноматериалов путем подбора кратности и степени минерализации пены; введение в состав формомочных смесей волокнистых армирующих и полимерных добавок; применение вибрации на стадиях приготовления пеномассы и формования из нее изделий; короткий цикл приготовления пеномасс.

Варьирование кратностью пены и В/Т, направленный выбор вида пенообразователя и минеральных компонентов, изменение конструкции пеносмесителя (пеногенератора) и параметров его работы позволяют с высокой степенью надежности получать заданные характеристики технической пены с содержанием в ней диспергированного воздуха до 92% объема и, как следствие, изготовлять пеноматериалы из различного сырья в широком диапазоне средней плотности (от 200 до 1000 кг/м³). Введение в смеси волокнистых армирующих и полимерных упрочняющих добавок является дополнительным мероприятием, обеспечивающим повышение физико-механических характеристик получаемых материалов, а применение вибрации облегчает минерализацию пены и гарантирует надежность бездефектного заполнения форм (опалубки) пеномассой.

Применение такой технологии высокопористых материалов не требует значительных капиталовложений, так как касается в основном модернизации смесительного и дозирующего оборудования, но при этом позволяет резко повысить эффективность получаемых материалов, равно как и рентабельность предприятий, их выпускающих.

Пеновый способ получения пеноматериалов в рассмотренном его виде имеет преимущество перед газобетонной технологией при переходе на монолитное домостроение, развитие которого четко наметилось в мировой практике.

Ячеистый бетон — один из самых перспективных материалов широкого назначения для монолитного строительства. С учетом коэффициента экономической эффективности его применение наиболее целесообразно в следующих трех направлениях: в виде конструкционно-теплоизоляционного материала со средней плотностью 800...850 кг/м³ (пористость около 70%) и прочностью не менее 5 МПа для стен малоэтажных зданий в сельском строительстве; в виде конструкционно-теплоизоляционного материала со средней плотностью 600...650 кг/м³ (пористость около 75%) и прочностью не

менее 2,5 МПа для ограждающих стен многоэтажных каркасных зданий; в виде теплоизоляционного материала со средней плотностью 200...250 кг/м³ (пористость более 90%) и прочностью не менее 0,3 МПа для тепловой изоляции кровель, чердачных и междуэтажных перекрытий.

Использование ячеистого бетона в монолитных ограждающих конструкциях позволяет отказаться от сложной транспортировки крупноразмерных панелей, исключает транспортный брак и дефекты конструкций, существенно сокращает расход металла и общую трудоемкость работ, что в результате позволяет значительно уменьшить стоимость ограждений и строительства в целом. Кроме того, монолитная тепловая изоляция устраняет швы и мостики холода, являющиеся причиной больших потерь теплоты, в несколько раз снижает трудоемкость на устройство теплоизоляции.

Монолитный ячеистый бетон представляет собой безавтоклавный материал, формуемый в построечных условиях. Поэтому основными технологическими задачами его производства являются: достижение заданных значений пористости с характеристиками, близкими к отимальным; создание необходимых условий для твердения вяжущего и, как следствие, омоноличивания минеральной композиции.

Реализация производства монолитного ячеистого бетона требует альтернативного решения: принять за основу газобетонную или пенобетонную технологию. В мировой практике преимущество отдано газобетону. Причины такого решения описаны выше.

Однако анализ показывает сложность газобетонной технологии и ее низкую надежность при производстве монолитного ячеистого бетона вследствие следующих факторов: невозможности достижения высоких значений пористости при условии вспучивания газобетона в узком пространстве опалубки из-за больших теплопотерь через ее стенки (очень большое отношение поверхности формы к объему); невозможности или чрезвычайной сложности регулирования теплового режима вспучивания, особенно в холодное время года, а также наличия значительного пристеночного трения; низкого качества структуры ячеистого бетона и большого числа трещин в межпоровых перегородках из-за разной скорости вспучивания центра и периферийных слоев газобетона (большой пристенный эффект); образования горбушки, удаление которой невозможно в данных условиях либо сопряжено с большими трудностями, а ее наличие препятствует надежному сцеплению слоев между собой (при горизонтальном формовании, например, при устройстве тепловой изоляции горбушка создает неровности).

Таким образом, технологические факторы предопределяют существенные преимущества пенобетонной технологии монолитного ячистого бетона, которые выражаются в следующем: в слабой зависимости объемов пористости и характеристик ее структуры от теплового режима формования конструкции; в повышенной устойчивости пенобетонной массы к сотрясениям, неизбежным в построеч-

ных условиях; в весьма незначительном влиянии поверхности опалубки на характеристику пористой структуры, т. е. в практическом отсутствии пристенного эффекта; в повышенной устойчивости и неизменности свойств пеномассы и прежде всего объема пористости в условиях перекачивания ее на большие расстояния по вертикали и горизонтали; в образовании ровной поверхности залитой ячеистой массы, независимо от размеров открытой поверхности.

Несмотря на эти очевидные достоинства, многолетний обширный эксперимент не дал положительных решений при применении традиционной технологии пенобетона в производстве монолитных конструкций даже при использовании синтетических пенообразователей.

Анализ неудач показывает, что отрицательный результат заложен в сущности традиционной технологии пенобетонов, когда отдельно приготовленную техническую пену смешивают с цементным или цементно-песчаным раствором. При таком способе поризации масс имеет место неизбежное разрушение части «чистой» пены и существенное ухудшение пористой структуры. Как уже говорилось выше, увеличение кратности пены и водотвердого отношения не приносит положительного эффекта, а иногда усугубляет негативные явления.

В данном случае, как и при производстве штучных изделий, эффективен способ сухой минерализации пены. Технология монолитного пенобетона, основанная на этом способе, опробована на ряде строительных объектов Минэнерго СССР, Министерства промышленности строительных материалов и других ведомств. При этом были достигнуты весьма положительные результаты как технического, так и экономического плана.

Совершенно очевидно, что эта технология требует постоянного совершенствования как в части оснащенности ее современном оборудованием, так и в нахождении новых зависимостей между технологическими параметрами и свойствами получаемого материала, использование которых позволяло бы создавать новые действенные возможности управления качеством получаемой продукции.

Очевидна также и перспективность этой технологии на современном этапе ее развития и при производстве штучных высокопористых изделий из различного сырья, и при монолитном строительстве с применением ячеистых бетонов.

Приведем еще один пример влияния технологии на качество и технико-экономические показатели теплоизоляционной конструкции трубопроводов тепловых сетей.

Устройство надежной тепловой изоляции тепловых сетей, общая длина которых в стране достигает многих миллионов километров, представляет собой весьма сложную и исключительно важную народнохозяйственную проблему. Особенно остро стоит вопрос повышения надежности теплоизоляционных конструкций, применяющихся при бесканальной укладке трубопроводов

В отечественной практике в этом случае используют в основном две конструкции тепловой изоляции стальных труб: на основе армированного пенобетона для условных диаметров труб 200...1000 мм и на основе битумоперлита для условных диаметров 50...400 мм.

Пористо-капиллярная структура пенобетона предопределяет весьма интенсивный подсос воды в толщу тепловой изоляции из грунта, что создает благоприятные условия для электрохимической коррозии наружной поверхности стальных труб. В то же время пенобетон обладает рядом ценных качеств: хорошей адгезией к металлу, примерно равным с ним коэффициентом линейного термического расширения, стоек к попеременному увлажнению и высушиванию и в условиях нагревания вплоть до температуры 400°С. Все эти качественные показатели обусловили эффективность его применения для тепловой изоляции тепловых сетей при бесканальной их прокладке, что доказано 35-летней практикой.

Значительное содержание активной серы в битуме (2...9% по массе) — главный недостаток битумоперлита. При систематических увлажнениях битумоперлита в процессе эксплуатации бесканальных тепловых сетей в материале происходит накапливание ионов S_4^{--} и S^{--}, создающих кислую среду ($pH<7$), что обусловливает высокую скорость электрохимической коррозии наружной поверхности труб. Тем не менее конструкция тепловой изоляции с применением битумоперлита при бесканальной прокладке трубопроводов получила широкое применение. Этому способствовали такие качества битумоперлита, как малая гигроскопичность (до 2% по массе), невысокая скорость увлажнения (1...1,5% по объему за 24 ч) при полном погружении в воду, отсутствие капиллярного подсоса при одностороннем контактировании с водой, а также высокая технологичность, недефицитность сырья, небольшие капитальные затраты на строительство заводов.

И тем не менее отсутствие надежной (бесшовной) гидроизоляции не позволяет обеспечить долголетнюю сохранность стальных труб вследствие имеющих место процессов электрохимической коррозии в обоих рассмотренных случаях, а также существенно снижает (особенно при применении пенобетона) теплоизоляционные свойства применяющихся материалов из-за их увлажнения.

Традиционная гидроизоляция, выполняемая путем обмотки теплоизоляционного слоя гидроизоляционными материалами (толью, рубероидом, полимерной пленкой и др.), не обеспечивает надлежащей защиты теплоизоляционной конструкции от увлажнения ввиду ее несовершенства, возможности повреждения при транспортировании изолированных труб и их монтаже. Поэтому исследовательские работы в области надежной защиты от увлажнения тепловой изоляции труб, укладываемых бесканальным способом (непосредственно в грунт), ведутся весьма интенсивно. Так, в ВНИИПИЭнергопроме были проведены широкие исследования по выбору материала и способа устройства надежной гидроизоляции рассматриваемых конструкций. Эти исследования выявили высокую эффективность экструзионного способа нанесения гидроизоляции из расплава полиэтилена марки ПЭВД (полиэтилен высокого давления). Широкий

комплекс положительных свойств полиэтилена (водонепроницаемость, стойкость к почвенной агрессии, высокие диэлектрические показатели, прочность и эластичность, исключительно высокая технологичность переработки и др.) делают его высокоэффективным при использовании в качестве гидроизоляционного слоя теплоизоляционной конструкции подземных трубопроводов бесканальной прокладки.

Опыт применения монолитной полиэтиленовой пленки в качестве гидроизоляции рассматриваемых конструкций показал, что пленка толщиной 2...3 мм водо- и паронепроницаема и надежно защищает пенобетон и битумоперлит от увлажнения. Тепловая сеть в целом становится более надежной и долговечной.

Тем не менее и в этом случае обнаружены серьезные негативные факторы. Главным из них является то, что на практике не удается полностью загерметизировать тепловую сеть. Поставляемые заводами трубы имеют незаизолированные концы длиной 200...300 мм, необходимые для проведения стыковки и сварки труб между собой, которые производятся непосредственно на месте монтажа тепловых сетей. В полевых условиях возникают трудности по устройству надежной тепло- и гидроизоляции этих участков, а также при устройстве П-образных компенсаторов, тройников, углов поворота.

Наличие даже незначительных повреждений гидроизоляции или брака при герметизации стыков неизбежно влечет за собой проникновение влаги в теплоизоляционный слой. В местах, где систематически под оболочку проникает почвенная влага, электрохимическая коррозия труб протекает особенно интенсивно, что объясняется образованием своеобразного парника. Теплоизоляционный материал под паронепроницаемой оболочкой не сохнет; эти места становятся входами и выходами блуждающих токов — инициаторов электрохимической коррозии труб.

Таким образом, отрицательным фактором является паронепроницаемость плотной полиэтиленовой пленки, под которой образующиеся водяные пары и летучие компоненты битумов создают избыточное давление (особенно большое при температуре 100°С и выше). Многократное воздействие такого давления приводит к растягиванию полиэтиленовой пленки, появлению в ней трещин, снижению прочности и в конечном счете ее долговечности.

Оригинальным технологическим решением, разработанным во ВНИИПИЭнергопроме, эти недостатки были исключены и, кроме того, была повышена теплоизолирующая способность конструкции.

Основная идея этого технологического решения состоит в формировании гидроизолирующей пленки (оболочки) во время ее изготовления и нанесения на теплоизоляционный слой трубы с такой пористой структурой, которая обеспечивала бы, с одной стороны, непроницаемость для капельной (грунтовой) влаги, а с другой — возможность прохождения через оболочку паров воды и газообразных продуктов без образования под оболочкой избыточного давления.

Эта идея была реализована путем введения под давлением в расплавленную полиэтиленовую композицию газовой фазы и экструзионного нанесения поризующейся оболочки на тепловую изоляцию трубы.

Процесс гидроизолирования теплоизоляционной конструкции трубы осуществляется в этом случае следующим образом. Расплав полиэтиленовой композиции, насыщенный газовой фазой в прессовой части экструдера, выдавливается из кольцевой головки машины в виде вспенивающейся цилиндрической оболочки при вакуумировании ее полости. Оболочка надевается на теплоизолированную трубу при осевом перемещении последней через специальное (внутреннее) кольцо экструзионной головки машины. Производительность экструдера составляет 1,5...2,5 м/мин в зависимости от заданной толщины гидроизоляционной оболочки.

Образующаяся на теплоизолированной трубе пористая полиэтиленовая оболочка характеризуется следующими показателями свойств: средняя плотность — 100...500 кг/м^3, теплопроводность — 0,05...0,08 Вт/(м·°С), прочность при растяжении — 1...5 МПа; оболочка может иметь толщину от 7 до 20 мм. При толщине оболочки 7...10 мм обеспечивается ее водонепроницаемость под гидростатическим давлением до 0,02, а при толщине 11...20 мм — не менее 0,3 МПа.

Водонепроницаемость поризованной полиэтиленовой оболочки достигается за счет уплотнения ее поверхностных слоев, что обеспечивается их быстрым охлаждением по выходе из экструзионной головки. Паропроницаемость объясняется наличием в этих слоях мельчайших пор, недоступных для проникновения через них капельной (грунтовой) воды.

Таким образом, новый технологический прием позволил не только создать надежную гидроизоляцию теплоизоляционной конструкции трубопроводов бесканальной прокладки но и существенно улучшить условия ее службы, снизить вероятность электрохимической коррозии труб, а также повысить теплоизолирующую способность тепловой изоляции за счет нанесения эффективного гидротеплоизоляционного слоя.

Применение рассмотренного способа создания теплоизоляционной конструкции трубопроводов при бесканальной прокладке тепловых сетей позволило получить существенный экономический эффект (свыше 10 руб. на 1 км двухтрубной тепловой сети) и в 1,5 раза увеличить продолжительность службы конструкций такого типа.

Все приведенные в данной главе примеры эффективных способов получения теплоизоляционных материалов и изделий с повышенными свойствами либо внедрены в производство на отдельных предприятиях, либо прошли достаточно широкую производственную проверку и приняты к внедрению.

Примеры совершенствования технологии высокопористых материалов и изделий с целью повышения их качества и технико-экономических показателей производства можно было бы продолжить.

Однако и приведенные примеры убедительно свидетельствуют о имеющихся неиспользованных пока еще возможностях в области технологии теплоизоляционных и акустических материалов и изделий. Приведены эти примеры для того, чтобы наглядно показать выпускникам вузов непрерывность развития научно-технического прогресса, подчеркнуть их задачи как специалистов отрасли в дальнейшем совершенствовании производства, повышения качества выпускаемой продукции, ресурсосбережения, обеспечении охраны окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

Аппен А. А. Химия стекла. М., 1974.

Айлер Р. Химия кремнезема. М., 1982.

Бабушкин В. И., Матвеев Г. М., Мчедлов-Петросян О. П. Термодинамика силикатов. М., 1986.

Баженов Ю. М., Шубенкин П. Ф., Дворкин Л. И. Применение промышленных отходов в производстве строительных материалов. М., 1986.

Бобров Ю. Л. Долговечность теплоизоляционных минераловатных материалов. М., 1987.

Богословский В. Н. Тепловой режим здания. М., 1979.

Волженский А. В. Минеральные вяжущие вещества. М., 1986.

Воробьев В. А., Андрианов Р. А. Полимерные теплоизоляционные материалы. М., 1972.

Горлов Ю. П., Меркин А. П., Устенко А. А. Технология теплоизоляционных материалов. М., 1980.

Горлов Ю. П., Меркин А. П., Зейфман М. И., Тотурбиев В. Д. Жаростойкие бетоны на основе композиций из природных и техногенных стекол. М., 1986.

Горлов Ю. П. Лабораторный практикум по технологии теплоизоляционных материалов. М., 1982.

Горяйнов К. Э., Горяйнова С. К. Технология теплоизоляционных материалов. М., 1982.

Горчаков Г. И. Строительные материалы. М., 1981.

Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М., 1970.

Дульнев Г. Н., Заричняк Ю. П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л., 1974.

Еремин Н. Ф. Процессы и аппараты в технологии строительных материалов. М., 1986.

Жуков Д. В. Основы технологии сушки теплоизоляционных изделий. М., 1974.

Искусственные пористые заполнители и легкие бетоны на их основе. Под ред. Ю. П. Горлова. М., 1987.

Киреев В. А. Краткий курс физической химии. М., 1978.

Кожевников И. И. Эффективные теплоизоляционные материалы для легких многослойных ограждающих конструкций. М., 1982.

Макаров Г. В., Стрельчук Н. А., Кушелев В. П., Орлов Г. Г. Охрана труда в химической промышленности. М., 1977.

Основы технологии полимерных строительных материалов/В. М. Хрулев, Г. М. Шутов, С. К. Гудьков и др. М., 1975.

Справочник по производству теплозвукоизоляционных материалов/Под ред. Ю. Л. Спирина. М., 1975.

Хрулев В. М. Производство конструкций из дерева и пластмасс. М., 1982.

Шебалин О. Д. Физические основы механики и акустики. М., 1981.

Штакельберг Д. И. Термодинамика структурообразования водно-силикатных дисперсных материалов. Рига, 1984.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Часть VI. Технология акустических материалов и изделий

Часть VII. Технико-экономические и экологические аспекты использования промышленных отходов в строительном комплексе

Часть VIII. Перспективные пути оптимизации функциональных и общестроительных свойств теплоизоляционных и акустических материалов

Учебное издание

Горлов Юрий Павлович

ТЕХНОЛОГИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ
И АКУСТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Зав. редакцией Б. А. Ягупов. Редактор Т. Ф. Мельникова. Художественный редактор С. Г. Абелин. Мл. редактор О. С. Смотрина. Технические редакторы Э. М. Чижевский, А. К. Нестерова. Корректор В. В. Кожуткина

ИБ № 8021

Изд. № СТР-561. Сдано в набор 06.05.89. Подп. в печать 23.10.89. Формат 60×88[1]/16. Бум. офсетная кн.-журн. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Объем 23,52 усл. печ. л. 21,52 усл. кр.-отт. 26,19 уч.-изд. л. Тираж 9000 экз. Зак. № 1470.
Цена 1 р. 20 к.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Московская типография № 8 при Госкомпечати СССР.
101898, Москва, Центр, Хохловский пер., 7.